

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อรองรับระบบไฟฟ้าสมัยใหม่

DISTRIBUTION TRANSFORMER DESIGN FOR A MODERN POWER SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-D-018-058

การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อรองรับระบบไฟฟ้าสมัยใหม่

DISTRIBUTION TRANSFORMER DESIGN FOR A MODERN POWER SYSTEM



บุญเลิศ สือเฉย

BOONLERT SUECHOEY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-D-018-058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DISTRIBUTION TRANSFORMER DESIGN FOR A MODERN POWER SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-D-018-058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อรองรับระบบไฟฟ้าสมัยใหม่
Thesis Title Distribution Transformer Design for a Modern Power System
นักศึกษา นายบุญเลิศ สือเฉย
รหัสประจำตัว 53610119
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-D-018-058

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กীরติ	ชยะกุลศิรี	
รศ.ดร.สมชาติ	จิรวิภากร	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินไหว	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสวรรณกุล	
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-306 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อรองรับระบบไฟฟ้าสมัยใหม่
นักศึกษา	นายบุญเลิศ สีอเฉย
รหัสประจำตัว	53610119
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาย ชมภูอินไหว

บทคัดย่อ

ภายใต้การผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทนแบบผสมในระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ ระบบไฟฟ้าพลังงานทดแทนอาจมีส่วนในการเพิ่มระดับกระแสฟลัดในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุง ตัวอย่างเช่น หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการหาและวิเคราะห์อุณหภูมิขดลวดขณะจ่ายโหลดและขณะลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมัน และเสนอวิธีการและเทคนิคใหม่ในการออกแบบหม้อแปลงสำหรับให้หม้อแปลงสามารถทนการลัดวงจรได้ ตามมาตรฐานใหม่ที่มีการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ประกาศใช้และเป็นไปตามมาตรฐาน IEC ในการศึกษานี้จะนำเสนอเทคนิคการออกแบบ วิธีการวัดและทำการประมาณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะลัดวงจร ในการศึกษาจะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของขดลวด เช่น อุณหภูมิของขดลวด อุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดหลังจากการลัดวงจร กระแสลัดวงจร แรงขณะลัดวงจร และเวลาในการลัดวงจร ในการทดสอบและวิเคราะห์ผลจากการออกแบบใหม่หม้อแปลงขนาด 160 kVA 250 kVA และ 400 kVA 3 เฟส 50 เฮิร์ต 22 KV-400/230 โวลต์ Dyn 11 ในการออกแบบใหม่ผู้ออกแบบจะทำการเลือกวัสดุ เช่น ขนาดของลวด ความหนาของฉนวนขดลวด และคุณสมบัติของแกนเหล็กซิลิกอนเพื่อให้ได้หม้อแปลงจำหน่ายที่มีคุณภาพที่ดีกว่าเดิมและมีอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Distribution Transformer Design for a Modern Power System
Student	Mr.Boonlert Suechoey
Student ID.	53610119
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr.Chai Chompoo-inwai

ABSTRACT

Under renewable generations mixed in today's modern power system, many of renewable generation resources tend to increase the fault level to an existing power system. Rules and regulation for power equipment and devices need to be revised and updated, of course, no exception for the distribution transformers. This thesis, therefore, presents the evaluation and analysis of the winding temperature on both loading and short circuit conditions of an oil-immersed distribution transformer and propose the novel and new technique transformer design method for improving short circuit withstand capability follow to new regulation of Provincial Electricity Authority (PEA) and IEC standard. In the study, the methodologies of measuring and estimating the winding temperature of the transformer during short circuited are presented and implemented. In the study, various winding parameters are analyzed including: the winding temperature, the hottest temperature of the winding after a short circuit, the short circuit current, short circuit force and short circuit duration. The tested and analyzed result are benefit for the newly proposed distribution transformer design of 160 kVA 250 kVA and 400 kVA 3 phases 50 Hz 22 kV-400/230 V, Dyn11. The new design approaches will enable designers to find a weak spot and proper selection of raw materials, such as winding size, insulation thickness and properties of the silicon steel for a better quality of distribution transformer and a longer lifetime.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.ชาย ชมภูอินทิว และ ผศ. ดร.เชาว์ ชมภูอินทิว ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ศุภี บรรจงจิตร และ รศ. ดร.มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะและให้ข้อคิดที่ดีแก่ข้าพเจ้าด้วยดีอย่างสม่ำเสมอตลอดมา

ขอขอบพระคุณ บริษัทพวงษ์พیمانการไฟฟ้า จำกัด และบริษัท ที.ดี.ทรานสปอร์ตเมอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจที่ดีตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้กำลังใจ คำแนะนำ เอื้อเฟื้อ ช่วยเหลือข้าพเจ้าตลอดมา

บุญเลิศ สือเฉย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินงาน.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ลำดับขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 หลักการใหม่ของงานวิจัย.....	3
1.7 รายละเอียดของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.2 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลง.....	5
2.2.1 การออกแบบแกนเหล็ก.....	5
2.2.2 การออกแบบขดลวด.....	10
2.2.3 การออกแบบฉนวน.....	12
2.2.4 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติของหม้อแปลง.....	13
2.2.5 การออกแบบตัวถังและครีบบระบายความร้อนของหม้อแปลง.....	18
2.3 การหาอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	20
2.3.1 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	20
2.4 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะลัดวงจร.....	20
2.4.1 การคำนวณระยะเวลาการลัดวงจร.....	20
2.4.2 การคำนวณกระแสลัดวงจร.....	21
2.4.3 การคำนวณอุณหภูมิของขดลวดขณะลัดวงจร.....	21
2.5 การคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC.....	23
2.6 การคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC.....	24
2.6.1 กระแสลัดวงจรขณะไม่สมมาตร.....	24
2.6.2 การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวรัศมี.....	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.3 การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวแกน.....	24
2.6.4 การคำนวณค่าของฮูปสเตอร์ส.....	25
บทที่ 3 ขั้นตอนการออกแบบและการทดสอบหม้อแปลง.....	26
3.1 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลง.....	26
3.2 การทดสอบหม้อแปลง.....	27
3.2.1 การทดสอบประจำ.....	28
3.2.2 การทดสอบเฉพาะแบบ.....	31
3.2.3 การทดสอบพิเศษ.....	32
บทที่ 4 ผลจากการออกแบบ การทดสอบและผลการทดสอบ.....	35
4.1 ผลการทดสอบประจำ.....	35
4.2 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียและอุณหภูมิของหม้อแปลง 160 kVA และ 250 kVA.....	36
4.3 พารามิเตอร์จากการออกแบบและขณะทดสอบการทนการลัดวงจร.....	37
4.4 ผลการคำนวณพารามิเตอร์ขณะลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	39
4.5 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันที่พิกัดโหลด.....	40
4.6 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบค่าความสูญเสีย อุณหภูมิเพิ่มของขดลวด และน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า.....	41
4.7 ผลจากการออกแบบ การทดสอบและผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 400 kVA.....	42
4.8 การวิเคราะห์ผลจากการวิจัย.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก ก รายละเอียดผลการทดสอบหม้อแปลง 160 kVA.....	56
ภาคผนวก ข รายละเอียดผลการทดสอบหม้อแปลง 250 kVA.....	77
ภาคผนวก ค ข้อกำหนดทางเทคนิคหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาค.....	103
ภาคผนวก ง ผลงานวิจัย.....	124
ประวัติผู้เขียน.....	148

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสูงสุดของอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดหลังการลัดวงจร.....	23
3.1 อุณหภูมิอ้างอิงของการปรับผลการทดสอบ.....	28
3.2 ค่าความต้านทานฉนวน.....	29
3.3 ระดับการฉนวนและระยะห่างในอากาศวัดจากส่วนที่มีไฟฟ้าของบุชชิ่ง.....	30
3.4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบ.....	31
3.5 อุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงชนิดจุ่มในน้ำมัน.....	32
3.6 ค่าอุณหภูมิที่ยอมให้ได้มากที่สุดของอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดหลังการลัดวงจร ด้วยกระแสลัดวงจรสมมาตร.....	34
4.1 ผลการทดสอบประจำหม้อแปลงไฟฟ้า 160 kVA, 250 kVA และ 400 kVA.....	36
4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหม้อแปลงที่ออกแบบระหว่างออกแบบไว้เดิม กับที่ออกแบบใหม่ของหม้อแปลง 160 kVA.....	36
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหม้อแปลงที่ออกแบบระหว่างออกแบบไว้เดิม กับที่ออกแบบใหม่ของหม้อแปลง 250 kVA.....	37
4.4 พารามิเตอร์จากการออกแบบที่นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ขณะทดสอบ Short Circuit Withstand หม้อแปลงขนาด 160 kVA.....	38
4.5 พารามิเตอร์จากการออกแบบที่นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ขณะทดสอบ Short Circuit Withstand หม้อแปลงขนาด 250 kVA.....	38
4.6 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการทนการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 160 kVA ด้านแรงดันสูง.....	39
4.7 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการทนการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 160 kVA ด้านแรงดันต่ำ.....	39
4.8 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการทนการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 250 kVA ด้านแรงดันสูง.....	39
4.9 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการทนการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 250 kVA ด้านแรงดันต่ำ.....	40
4.10 ข้อมูลทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 400 kVA.....	43
4.11 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่กักโหลดของหม้อแปลงขนาด 400 kVA.....	45
4.12 ผลการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดของหม้อแปลงขนาด 400 kVA.....	46
4.13 การเปรียบเทียบผลการออกแบบหม้อแปลงระหว่างแบบเดิมกับที่ทำการออกแบบใหม่ หม้อแปลงขนาด 400 kVA.....	48
4.14 พารามิเตอร์จากการออกแบบที่นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ขณะทดสอบ Short Circuit Withstand หม้อแปลงขนาด 400 kVA.....	48

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 400 kVA ด้านแรงดันสูง.....	49
4.16 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการลัดวงจรของหม้อแปลง ขนาด 400 kVA ด้านแรงดันต่ำ.....	49



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจัดเรียงแกนเหล็กในพื้นที่วงกลม.....	6
2.2 โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟส ชนิดคอร์.....	7
2.3 รายละเอียดของขาแกนเหล็ก Outer limb.....	7
2.4 รายละเอียดของขาแกนเหล็ก Center limb	8
2.5 รายละเอียดของโยค(Yoke)	8
3.1 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงที่เหมาะสมและการคำนวณพารามิเตอร์ของการทดสอบ การทนการลัดวงจร.....	27
4.1 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด	35
4.2 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดโดยวิธีลัดวงจร	35
4.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน 160 kVA ที่พิกัดโหลด	40
4.4 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน 250 kVA ที่พิกัดโหลด	41
4.5 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบค่าความสูญเสียระหว่าง original regulation กับ new regulation	41
4.6 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบค่าอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง 160 kVA ระหว่าง original regulation กับ new regulation	41
4.7 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบค่าอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง 250 kVA ระหว่าง original regulation กับ new regulation	42
4.8 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันหม้อแปลงขนาด 160 kVA และ 250 kVA ระหว่าง original regulation กับ new regulation.....	42
4.9 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ ของหม้อแปลงที่ทดสอบขนาด 400 kVA.....	43
4.10 ผลการทดสอบอุณหภูมิขดลวดด้านแรงดันต่ำตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 11.....	44
4.11 ผลการทดสอบอุณหภูมิขดลวดด้านแรงดันสูงตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 และ อุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบ.....	44
4.12 ผลการทดสอบอุณหภูมิของน้ำมันที่ตำแหน่ง 12, 13, 14, 15, 16 และ 17.....	45
4.13 ผลการวัดความต้านทานขดลวดแรงดันสูง ณ จุดตัดไฟ.....	45
4.14 ผลการวัดความต้านทานขดลวดแรงดันต่ำ ณ จุดตัดไฟ.....	45
4.15 ผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน(ตำแหน่งที่ 17 ของรูปที่ 4.9) ที่พิกัดโหลด.....	46
4.16 การเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดแรงดันต่ำระหว่างผลการทดสอบ กับผลการคำนวณที่พิกัดโหลด.....	47
4.17 การเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดแรงดันสูงระหว่างผลการทดสอบ กับผลการคำนวณที่พิกัดโหลด.....	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนระหว่างแบบเดิมกับที่ทำการออกแบบใหม่ที่พิกัดโหลดหม้อแปลงขนาด 400 kVA.....	50
4.19 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างแบบเดิมกับที่ทำการออกแบบใหม่ที่พิกัดโหลดหม้อแปลงขนาด 400 kVA.....	50
4.20 การเปรียบเทียบผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดระหว่างแบบเดิมกับที่ทำการออกแบบใหม่ที่พิกัดโหลดหม้อแปลงขนาด 400 kVA.....	51



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ในปัจจุบัน จะมีระบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทนซึ่งถือว่ามี ความสำคัญต่อระบบการผลิตไฟฟ้า ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคก็จะมีระบบการผลิต ไฟฟ้าพลังงานทดแทนต่อเข้ากับระบบจำหน่าย เช่น โซลาร์เซลล์(PV) พลังงานลม และระบบชีวมวล เป็นต้น หม้อแปลงไฟฟ้าจึงถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบจำหน่าย เมื่อระบบการผลิตเหล่านี้ใน บางครั้งอาจเกิดสิ่งผิดปกติขึ้น ทำให้มีกระแสฟลด์เข้าสู่ระบบจำหน่าย ก็อาจจะส่งผลให้หม้อแปลง ไฟฟ้าและระบบการส่งและจ่ายไฟฟ้าขัดข้องไปด้วย สาเหตุส่วนใหญ่ที่ทำให้หม้อแปลงเกิดปัญหาใน การใช้งานก็คือเกิดจากการจ่ายโหลดเกิน ซึ่งจะส่งผลให้อาจเกิดการลัดวงจรภายใน เมื่อเกิดการ ลัดวงจรขึ้นจะส่งผลให้ขดลวดของหม้อแปลงชำรุดเสียหายเนื่องจาก กระแสลัดวงจร แรงขณะลัดวงจร (Short circuit forces) อุณหภูมิของขดลวดขณะลัดวงจร อีกทั้งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(PEA) ได้ ประกาศใช้ข้อกำหนดใหม่ของหม้อแปลงจำหน่ายจะต้องผ่านการทดสอบการทนการลัดวงจร ดังนั้น ถ้าสามารถทำการปรับปรุงการออกแบบหม้อแปลงโดยคำนึงถึง สภาวะโอเวอร์โหลด สภาวะลัดวงจร ก็จะช่วยให้อาจใช้งานได้ยาวนานหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังส่งผลให้ระบบจำหน่ายมี เสถียรภาพมากยิ่งขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้จึงขอเสนอวิธีการพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบหม้อ แปลงจำหน่าย ให้สามารถทนต่อสภาวะการใช้งานโอเวอร์โหลด และทนต่อการลัดวงจร(Short circuit withstand) ตามข้อกำหนดใหม่ของ PEA และสามารถทนต่อฟลด์ (Fault) ที่อาจจะเกิดจาก ระบบจำหน่าย โดยทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ การลัดวงจร เช่น อุณหภูมิของขดลวด แรงขณะลัดวงจร ผลที่ได้จากการปรับปรุงออกแบบจะถูกนำไป ทำการผลิตหม้อแปลงต้นแบบ แล้วทำการทดสอบหม้อแปลง Routine test, Temperature rise test, BIL test และ Short circuit withstand test ผลที่ได้จากการทดสอบจะเป็นข้อมูลที่ยืนยันได้ ว่าสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ และวิเคราะห์พารามิเตอร์ของหม้อแปลงให้มี ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC และข้อกำหนดใหม่ของ PEA

1.2 วัตถุประสงค์การดำเนินงาน

1. เพื่อศึกษาเทคนิคในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้สามารถทนต่อการลัดวงจรได้
2. เพื่อศึกษาและค้นคว้าวิจัยทางทฤษฎีตามข้อกำหนดมาตรฐาน IEC และ ANSI/IEEE และจาก บทความวิจัยต่างๆ แล้วนำหลักการนี้ไปทำการปรับปรุงพารามิเตอร์สำหรับออกแบบหม้อ แปลงไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาวิธีการคำนวณอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดและขณะลัดวงจร
4. เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบและคำนวณแรงขณะลัดวงจร(Short circuit forces) ของหม้อ แปลงไฟฟ้า
5. นำผลจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าไปสร้างจริงแล้วทำการทดสอบ Routine test, Temperature rise test, BIL test และ Short circuit withstand test
6. เพื่อนำผลที่ได้จากการออกแบบมาทำการเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในทางปฏิบัติว่ามี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อสาธารณะ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างกันอย่างไร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาค้นคว้าเทคนิคในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดจุ่มในน้ำมันตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (160 kVA, 250 kVA และ 400 kVA) แล้วนำผลจากการออกแบบไปทำการสร้างหม้อแปลงจริง
2. ทำการคำนวณ และวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด และขณะลัดวงจร เพื่อหาอุณหภูมิขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ทำการคำนวณและวิเคราะห์แรงขณะลัดวงจร (Short circuit forces) ของหม้อแปลงไฟฟ้า
4. ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของการคำนวณกับผลจากการทดสอบจริงกับมาตรฐาน IEC และ ANSI/IEEE ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร
5. นำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้เป็นฐานข้อมูลในการอ้างอิงการออกแบบต่อไป

1.4 ลำดับขั้นตอนการวิจัย

1. ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีจากบทความวิชาการต่างๆ และจากข้อกำหนดมาตรฐาน IEC และ ANSI/IEEE
2. ทำการออกแบบและวิเคราะห์ผลจากการออกแบบหม้อแปลงเทียบกับมาตรฐาน
3. ทำการพิจารณาพารามิเตอร์จากการออกแบบว่าเหมาะสมหรือไม่
4. ทำการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าตามที่ได้ออกแบบไว้ แล้วทำการทดสอบ Routine test, Temperature rise test และ BIL test และ Short circuit withstand test
5. ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้จากข้อ 4 เปรียบเทียบกับผลจากการออกแบบและการคำนวณ เพื่อสรุปเป็นแนวทางในการจัดทำข้อมูลอ้างอิงสำหรับการออกแบบต่อไป
6. ทำการสรุปผลและข้อเสนอ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำหลักการของทฤษฎีจากมาตรฐาน บทความวิจัยและบทความวิชาการต่างๆ มาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงการออกแบบหม้อแปลงให้สามารถทนต่อสภาวะลัดวงจร
2. ทำให้ทราบถึงเทคนิคและวิธีการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
3. ทำให้สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและลดอันตรายจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าลงได้
4. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้อ้างอิงในการปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติของการใช้งานให้ดียิ่งขึ้นสามารถรับโหลดและทนการลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด
5. สามารถนำผลจากการวิจัยมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาช่วยในการทำนายหาอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดและขณะลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 หลักการใหม่ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดจุ่มน้ำมันระบายความร้อนด้วยน้ำมันโดยอากาศธรรมชาติ(ONAN) การคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วนำผลลัพธ์จากการออกแบบไปสร้างหม้อแปลงจริง แล้วทำการทดสอบโดยเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับผลจากการออกแบบ แล้วนำผลการทดสอบที่ได้มาใช้เป็นฐานข้อมูลในการอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงการออกแบบต่อไป

1.7 รายละเอียดของงานวิจัย

1. บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขต ลำดับขั้นตอนการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ หลักการใหม่ของงานวิจัย และรายละเอียดของงานวิจัย
2. บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวถึง การทบทวนวรรณกรรม ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า และการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ
3. บทที่ 3 ขั้นตอนการออกแบบและการทดสอบหม้อแปลง จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลง การทดสอบหม้อแปลงในลักษณะต่างๆ วิธีการทดสอบประจำ การทดสอบเฉพาะและการทดสอบแบบพิเศษ
4. บทที่ 4 ผลจากการออกแบบ การทดสอบ และผลการทดสอบ จะกล่าวถึง ผลการทดสอบพารามิเตอร์จากการออกแบบ ผลการทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด และขณะเกิดการลัดวงจร และการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ การวิเคราะห์ผลจากการวิจัย
5. บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง, การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย การคำนวณอุณหภูมิและอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันและขดลวด การคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงขณะทดสอบการทนการลัดวงจร และการคำนวณหาอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะลัดวงจร

2.1 การทบทวนวรรณกรรม [2-23]

ในปี 2005 C. Chompoo-inwai และคณะ ได้นำเสนอถึงสาเหตุที่ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดกระแสฟลัดตีในระบบเพิ่มสูงขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาปรับปรุงอุปกรณ์ต่างๆ ให้สามารถทนต่อกระแสลัดวงจร และให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในปี 2005 B. Suechoey และคณะ ได้นำเสนอเทคนิคการคำนวณและวิเคราะห์อุณหภูมิและความดันของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายขณะจ่ายโหลด

ในปี 2008 T.C.B.N. Assuncao และคณะ ได้กล่าวถึงวิธีการหาอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวด โดยการคำนวณจากฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำมันด้านบนโดยใช้อุณหภูมิแวดล้อมและทำการวัดอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายโหลด

ในปี 2009 R.P.P. Smeets และคณะ ได้นำเสนอถึงสาเหตุของการเสียหายของหม้อแปลงเนื่องจากการลัดวงจรจากภายนอก ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการลัดวงจร เช่น แรงขณะลัดวงจรตามแนวรัศมี(Radial Force) และแรงตามแนวแกน (Axial Force) และยังต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิของขดลวด อุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวด

ในปี 2011 Geno. Peter .P ได้กล่าวถึงสาเหตุการชำรุดของหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากการลัดวงจรจากภายนอก การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการลัดวงจร และได้อธิบายถึงวิธีการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการลัดวงจร

ในปี 2011 Yunus Bicen และคณะ ได้กล่าวถึงวิธีการหาอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้โมเดลความร้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้อุณหภูมิน้ำมันด้านบน และอุณหภูมิจุดร้อนสุดมาทำการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการหาอายุของฉนวน

ในปี 2012 Ali Mamizadeh และ Ires Iskender ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์และเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน

ในปี 2014 B. Suechoey และคณะ ได้นำเสนอเทคนิคและแนวทางในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้สามารถทนต่อสภาวะลัดวงจร โดยได้กล่าวถึงแนวทางในการออกแบบและการเลือกพารามิเตอร์ในการออกแบบให้หม้อแปลงสามารถรับโหลดและทนต่อสภาวะขณะลัดวงจรได้และมีอุณหภูมิขณะใช้งานและขณะลัดวงจรเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด

ในปี 2015 B. Suechoey และคณะ ได้นำเสนอเทคนิคการออกแบบโดยทำการปรับปรุงความสามารถในการทนการลัดวงจรของหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายโดยพิจารณาแรงขณะลัดวงจรและอุณหภูมิขณะลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2015 Ahmet Y. Arbul และคณะ ได้นำเสนออัลกอริทึมของการคำนวณหาอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดเพื่อทำการเปรียบเทียบกับการทดสอบในทางปฏิบัติ

ในปี 2015 Zoran Radakovic และคณะ ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์ในการหาค่าความสูญเสียและหาค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ

ในปี 2017 T. Qian และคณะ ได้นำเสนอวิธีการใช้ Support vector ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบโมเดลของอุณหภูมิน้ำมันด้านบน

2.2 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนั้น วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบข้อกำหนดรายละเอียด (Specification) ของหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อที่จะได้ทำการออกแบบหม้อแปลงให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามที่ต้องการ ข้อกำหนดรายละเอียดหรือข้อมูลเริ่มต้น (Initial Data) ที่ใช้สำหรับออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายมีดังนี้

- พิกัดกำลังไฟฟ้า
- จำนวนเฟส
- ความถี่ใช้งาน
- แรงดันด้านแรงสูงและแรงต่ำ
- เวกเตอร์กรุป
- ชนิดของการระบายความร้อน
- เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์

ในการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายนั้นสามารถแบ่งขั้นตอนสำหรับการออกแบบได้ดังนี้

- ออกแบบแกนเหล็ก
- ออกแบบขดลวดและฉนวน
- คำนวณคุณสมบัติต่างๆ ของหม้อแปลง
- ออกแบบตัวถังและครีระบายความร้อน

2.2.1 การออกแบบแกนเหล็ก (Core Design)

แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยแผ่นเหล็กซิลิกอนบางๆ นำมาวางเรียงกันแต่ละแผ่นฉาบด้วยฉนวนเพื่อลดการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กลดลง ความหนาของแผ่นเหล็กซิลิกอนมีผลต่อการเกิดกระแสไหลวนในแกนเหล็ก จำนวนเปอร์เซนต์ของซิลิกอนในเหล็ก รวมทั้งขั้นตอนในการทำแผ่นเหล็กซิลิกอนมีผลต่อการเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งสองเกิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ในแกนเหล็ก การเพิ่มจำนวนซิลิกอนทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง แต่จะทำให้เหล็กนั้นแข็งและเปราะ เหล็กซิลิกอนที่ใช้โดยทั่วไปในการประกอบสร้างหม้อแปลงจำหน่ายนี้เป็นเกรด M-3, M-4 และ M-5 ความหนา 0.23, 0.27 และ 0.30 มม. ค่าตัวประกอบของแผ่นเหล็กแผ่นมีค่า 0.97 และมีความหนาแน่น 7.65 kg/dm³

ในการออกแบบหม้อแปลงที่กำหนดขนาดมาให้สามารถที่จะออกแบบได้หลายวิธี เช่น ออกแบบให้ต้นทุนน้อยที่สุดโดยไม่คำนึงถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย หรือ ในทางกลับกันอาจจะออกแบบให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด การออกแบบหม้อแปลงโดยให้ประหยัดที่สุดสามารถกระทำได้ถึงค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งเท่านั้น เพราะจะถูกจำกัดด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลง และถูกจำกัดด้วยค่าความหนาแน่น ฟลักซ์ขั้วในตัวในแกนเหล็กหม้อแปลงที่ผลิต โดยทั่วไปจะทำการออกแบบโดยประมาณให้มีราคาของแกนเหล็กเท่ากับราคาของขดลวดทองแดง

ในด้านประสิทธิภาพของหม้อแปลงนั้น สามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่โหลดที่กำหนดได้โดยการออกแบบให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในทองแดง แต่หม้อแปลงที่ออกแบบนี้เป็นหม้อแปลงในระบบจำหน่ายมีแนวโน้มว่าวันหนึ่งๆ จะใช้งานที่โหลดน้อยกว่าที่กำหนดเป็นเวลานานมากกว่าการใช้โหลดที่กำหนด การออกแบบจึงมักจะให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าน้อยเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะหาได้จากการเลือกค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก(B) ซึ่งกำหนดด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

แกนเหล็กของหม้อแปลงนี้เป็นแบบคอร์ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กเป็นรูปเหลี่ยมอัดในวงกลมจำนวนชั้น(Step) ของแกนเหล็กขึ้นอยู่กับารออกแบบ ถ้าจำนวนชั้นของแกนเหล็กมากก็จะได้พื้นที่หน้าตัดมาก เมื่อเรียงแกนเหล็กเสร็จแล้วก่อนจะประกอบเหล็กเคลมพ์จะใช้กระดาษฉนวนกั้นระหว่างเหล็กซิลิคอนกับเหล็กเคลมพ์เสียก่อน เพื่อป้องกันการเหนี่ยวนำในเหล็กเคลมพ์ทำให้เกิดความร้อนสูง

การคำนวณหาขนาดของแกนเหล็กที่นำมาจัดเรียงในวงกลมในแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

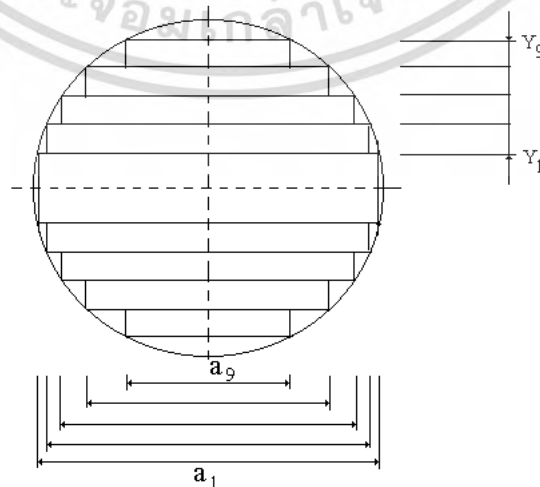
$$F(Y) = 2 \left(\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - Y^2} \right) \quad (2.1)$$

โดยที่

$F(Y)$ คือ ความกว้างของหน้าเหล็ก(a_j)ในแต่ละชั้น(มม.)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเหล็ก(มม.)

Y คือ ความหนาของแกนเหล็กในแต่ละชั้น(มม.)

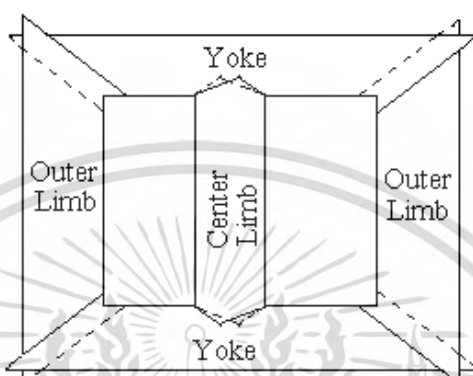


รูปที่ 2.1 การจัดเรียงแกนเหล็กในพื้นที่วงกลม

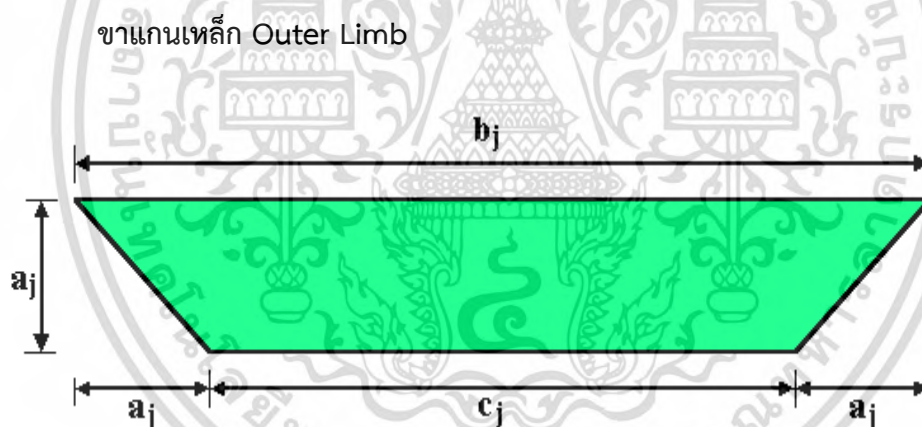
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของแกนเหล็ก (Core Construction)

ในการจัดเรียงแผ่นเหล็กเพื่อให้เป็นโครงสร้างแกนเหล็กหม้อแปลง จะมีส่วนประกอบของขาแกนเหล็ก (Outer Limbs และ Center Limbs) และโยค (Yoke) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กมีเส้นทางขนานกับแนวรีดของแผ่นเหล็กมากที่สุด ดังนั้นในการตัดแผ่นเหล็กตรงรอยต่อของขาแกนเหล็กและโยคจะทำมุมกัน 45 องศา



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแกนเหล็กของหม้อแปลง 3 เฟสชนิดคอร์



รูปที่ 2.3 รายละเอียดของขาแกนเหล็ก Outer limb

จากรูปที่ 2.3 กำหนดให้

c_j คือ ความสูงด้านในของขาแกนเหล็ก Outer Limb ที่ชั้นใด ๆ หรือความสูงของช่องหน้าต่าง(Windows)

b_j คือ ความสูงด้านนอกของขาแกนเหล็ก Outer Limb ที่ชั้นใด ๆ

เมื่อ $j = 1$ จะได้

$$b_j = 2a_j + c_j \quad (2.2)$$

และเมื่อ $j \neq 1$ จะได้

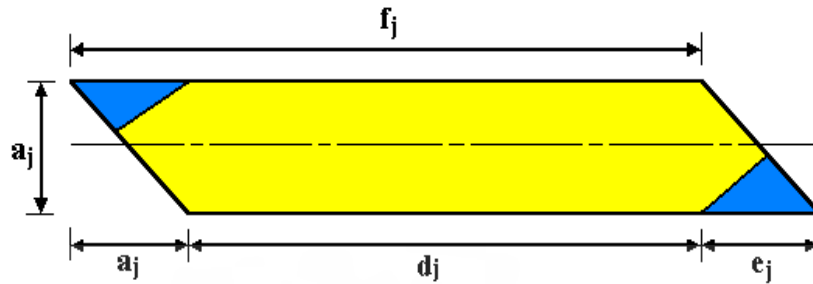
$$c_j = c_{j-1} + a_{j-1} - a_j \quad (2.3)$$

$$b_j = b_{j-1} - a_{j-1} + a_j \quad (2.4)$$

เมื่อ $j = 1, 2, 3, \dots, 9$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนขาแกนเหล็ก Center Limb



รูปที่ 2.4 รายละเอียดของขาแกนเหล็ก Center Limb

จากรูปที่ 2.4 กำหนดให้

f_j คือ ความสูงของขาแกนเหล็ก Center Limb ที่ชั้นใด ๆ

e_j คือ ความยาวที่ตัดออกเพื่อเข้ามุมในการจัดเรียงแผ่นเหล็ก Center Limb ที่ชั้นใด ๆ

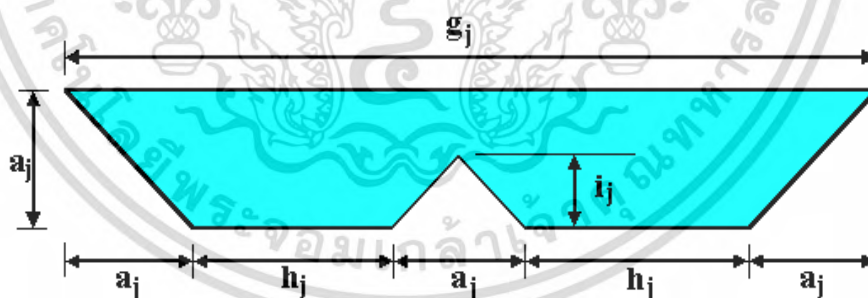
β คือ มุมมีค่า 45 องศา

โดยที่

$$e_j = a_j - 20 \quad (2.5)$$

$$f_j = d_j + e_j \quad (2.6)$$

โยค (Yoke)



รูปที่ 2.5 รายละเอียดของโยค(Yoke)

จากรูปที่ 2.5 กำหนดให้

h_j คือ ความกว้างด้านในของโยคที่ชั้นใด ๆ

g_j คือ ความกว้างด้านนอกของโยคที่ชั้นใด ๆ

i_j คือ ความสูงของพื้นที่สามเหลี่ยมที่ตัดออก

α คือ มุมมีค่า 90 องศา

เมื่อ $j = 1$ จะได้

$$g_j = 2h_j + 3a_j \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อ $j \neq 1$ จะได้

$$h_j = h_{j-1} + a_{j-1} - a_j \quad (2.8)$$

$$g_j = g_{j-1} - a_{j-1} + \quad (2.9)$$

$$i_j = (a_j / 2) \tan [(180 - \alpha) / 2] \quad (2.10)$$

การคำนวณน้ำหนักของแกนเหล็ก(Core Weight Calculation)

น้ำหนักของแกนเหล็กทั้งหมดประกอบด้วย น้ำหนักของ Outer Limb, น้ำหนักของ Center Limb และน้ำหนักของ Yoke โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

น้ำหนักขาแกนเหล็ก Outer Limb

$$W_{OL} = b_s D_s a_j P_{CS_{OL}} (c_j + a_j) \quad (2.11)$$

โดยที่

b_s คือ ความหนาของแผ่นเหล็ก(มม.)

W_{OL} คือ น้ำหนักของ Outer Limb ที่ขึ้นใดๆ

D_s คือ ความหนาแน่นของแผ่นแกนเหล็กมีค่า 7.65 kg/dm^3

$P_{CS_{OL}}$ คือ จำนวนแผ่นเหล็กของ Outer Limb ที่ขึ้นใดๆ

น้ำหนักขาแกนเหล็ก Center Limb

$$W_{CL} = b_s D_s P_{CS_{CL}} a_j (f_j - e_j) \quad (2.12)$$

โดยที่

W_{CL} คือ น้ำหนักของ Center Limb ที่ขึ้นใดๆ

$P_{CS_{CL}}$ คือ จำนวนแผ่นเหล็กของ Center Limb ที่ขึ้นใดๆ

น้ำหนักโยค (Yoke)

$$W_Y = b_s D_s P_{CS_Y} [a_j \times (2h_j + 2a_j) - (1/2)i_j a_j] \quad (2.13)$$

โดยที่

W_Y คือ น้ำหนักของ Yoke ที่ขึ้นใดๆ

P_{CS_Y} คือ จำนวนแผ่นเหล็กของ Yoke ที่ขึ้นใดๆ

ดังนั้น น้ำหนักรวมทั้งหมดของแกนเหล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$W_T = \sum (W_{OL} + W_{CL} + W_Y) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

W_T คือ น้ำหนักรวมทั้งหมดของแกนเหล็ก

2.2.2 การออกแบบขดลวด (Winding Design)

ขดลวดแรงดันต่ำ (Low Voltage Winding)

ในการออกแบบขดลวดแรงต่ำจะเลือกแบบที่ใช้พันขดลวดชนิดสไปรัล(spiral) โดยใช้ลวดทองแดงแบนสี่เหลี่ยมหุ้มกระดาษฉนวน สมการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบขดลวดแรงต่ำมีดังนี้

1. จำนวนรอบขดลวดแรงต่ำ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_S = V_S / (4.44fABm) \quad (2.15)$$

โดยที่

V_S คือ แรงดันของขดลวดแรงต่ำต่อเฟส

2. ความหนาแน่นของกระแสหาได้จากสมการ

$$J = I_s / a_s \quad (2.16)$$

โดยที่

I_s คือ กระแสของขดลวดแรงต่ำต่อเฟส(แอมแปร์)

a_s คือ พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำด้านแรงต่ำ(แอมแปร์ต่อตร.มม.)

กำหนดให้

H_{la} คือ ความสูงของขดลวดแรงต่ำตามแนวแกน(axial)(มม.)

W_{lr} คือ ความกว้างของขดลวดแรงต่ำตามแนวรัศมี(radial)(มม.)

W_{lc} คือ ความกว้างของลวดตัวนำชนิดแบน(มม.)

T_{lc} คือ ความหนาของลวดตัวนำชนิดแบน(มม.)

N_{SL} คือ จำนวนรอบของขดลวดที่พันในแต่ละชั้น

W_{in} คือ ความกว้างของฉนวนหุ้ม-ท้ายของขดลวดที่พัน(มม.)

L_a คือ จำนวนชั้นของขดลวดที่พัน

T_{in} คือ ความหนาของกระดาษฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด(มม.)

N_{LA} คือ จำนวนตัวนำที่จัดวางตามแนวแกน

N_{LR} คือ จำนวนตัวนำที่จัดวางตามแนวรัศมี

3. ความสูงของขดลวดแรงต่ำตามแนวแกน(axial) หาได้จากสมการ

$$H_{la} = W_{lc} \times N_{LA} \times (N_{SL} + 1) + 2W_{in} \quad (2.17)$$

4. ความกว้างของขดลวดแรงต่ำตามแนวรัศมี(radial) หาได้จากสมการ

$$W_{lr} = (T_{lc} \times N_{LR} \times L_a) + T_{in} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความต้านทานต่อเฟสของขดลวดแรงต่ำหาได้จากสมการ

$$R = \rho L N_S / a_s \quad (2.19)$$

โดยที่

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของตัวนำ (Specific Resistive of Conductor)
($\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$)

ขดลวดแรงดันสูง (High Voltage Winding)

ในการออกแบบขดลวดแรงสูงจะเลือกแบบที่ใช้พันขดลวดชนิดสกรอสโอเวอร์ (Cross over) โดยใช้ลวดทองแดงชนิดกลมอาบฉนวน สมการที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบขดลวดแรงสูงมีดังนี้

1. คำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดแรงสูง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_p = (V_p / V_s) \times N_s \quad (2.20)$$

โดยที่

V_p คือ แรงดันของขดลวดแรงสูงต่อเฟส

2. ความหนาแน่นของกระแส สามารถหาได้จากสมการ

$$J = I_p / a_p \quad (2.21)$$

โดยที่

I_p คือ กระแสของขดลวดแรงสูงต่อเฟส (แอมแปร์)

a_p คือ พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำต้านแรงสูง (แอมแปร์ต่อตร.มม.)

กำหนดให้

H_{ha} คือ ความสูงตามแนวแกนของขดลวดแรงสูง (มม.)

b_{h1} คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับโยค (Yoke) (มม.)

W_{hr} คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงสูง (มม.)

H_{as} คือ ความสูงตามแนวแกนของขดลวดแรงสูงในแต่ละ section (มม.)

N_{hs} คือ จำนวน section ของขดลวดแรงสูง

b_{h2} คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดในแต่ละ section (มม.)

N_{ps} คือ จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละ section

N_{pl} คือ จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละชั้น

N_s คือ จำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละ section

d_c คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำชนิดกลม (มม.)

T_{in} คือ ความหนาของกระดาษฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดที่พัน (มม.)

3. ความสูงตามแนวแกนของขดลวดแรงสูง สามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเรียงพิมพ์เอกสารนี้โดยผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{ha} = H_{la} - 2b_{h1} \quad (2.22)$$

4. ความสูงตามแนวแกนของขดลวดแรงสูงในแต่ละ section หาได้จากสมการ

$$H_{as} = [H_{ha} - (N_{hs} - 1) \times b_{h2}] / N_{hs} \quad (2.23)$$

5. จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละ section สามารถหาได้จากสมการ

$$N_{ps} = N_p / N_{hs} \quad (2.24)$$

6. จำนวนรอบของขดลวดในแต่ละชั้น สามารถหาได้จากสมการ

$$N_{pl} = H_{as} / d_c \quad (2.25)$$

7. จำนวนชั้นของขดลวดในแต่ละ section สามารถหาได้จากสมการ

$$N_{ls} = N_{ps} / N_{pl} \quad (2.26)$$

8. ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงสูง สามารถหาได้จากสมการ

$$W_{hr} = d_c \times N_{ls} + (N_{ls} - 1) \times T_{in} \quad (2.27)$$

การคำนวณน้ำหนักของขดลวด (Winding Weight Calculation)

น้ำหนักของขดลวดจะขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของวัสดุตัวนำ จำนวนรอบของขดลวด และพื้นที่หน้าตัดของขดลวด โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$M_w = D_w a_w L N \quad (2.28)$$

โดยที่

M_w คือ น้ำหนักของตัวนำ (กก.)

D_w คือ ความหนาแน่นของตัวนำทองแดงมีค่าเท่ากับ 8.9×10^3 กก./ม.³

a_w คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ (ตร.มม.)

2.2.3 การออกแบบฉนวน (Insulation Design)

ในการออกแบบฉนวนนั้นเป็นการออกแบบเพื่อหาความหนาฉนวนของขดลวดกับส่วนต่างๆ ฉนวนของขดลวดสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. ฉนวนหลัก (Major Insulation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนหลักประกอบด้วยฉนวนระหว่างขดลวดแรงต่ำกับขาแกนเหล็ก ฉนวนระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ

2. ฉนวนรอง (Minor Insulation)

ประกอบด้วยฉนวนระหว่างรอบและระหว่างชั้นของขดลวด ซึ่งรายละเอียดของการจัดวางฉนวนขึ้นอยู่กับชนิดของขดลวด และวิธีการของวิศวกรผู้ออกแบบ

ในการออกแบบฉนวนของขดลวดแรงต่ำกับขาของแกนเหล็ก หรือฉนวนระหว่างชั้นของขดลวดแรงต่ำ จะพิจารณาเฉพาะความแข็งแรงทางกลเท่านั้น แต่ระยะความหนาของฉนวนอื่นๆ การพิจารณาจะขึ้นอยู่กับแรงดันสูงที่กำหนด และการออกแบบของวิศวกรผู้ผลิต

2.2.4 การคำนวณหาคุณสมบัติของหม้อแปลง (Transformer Characteristics Calculation)

1. กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (No Load Loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดหรือเรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss) จะประกอบด้วย การสูญเสียดังต่อไปนี้

- การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis) ในแกนเหล็ก
- การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก
- การสูญเสียในขดลวดเนื่องจากกระแสกระตุ้น
- การสูญเสียปลิกย้อย เนื่องจากกระแสไหลวนในอุปกรณ์ที่ใช้จับยึดแกนเหล็ก
- การสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริก

โดยทั่วไปกระแสกระตุ้นของหม้อแปลงจําหน่ายมีค่าประมาณ 1-5 % ของกระแสโหลดเต็ม ดังนั้นการสูญเสียในขดลวดเนื่องจากกระแสกระตุ้นสามารถที่จะไม่นํามาพิจารณาได้ อีกทั้งแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงจําหน่ายมีระดับต่ำกว่า 50 กิโลโวลต์ จึงทำให้การสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกไม่ต้องนํามาพิจารณาเช่นเดียวกัน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดจะประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

การสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิสในแกนเหล็ก

เป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในการกลับทิศทางของแม่เหล็ก การลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเตอร์รีซิส สามารถทำได้โดยการใช้แกนเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิคอน (Silicon) การสูญเสียนี้นขึ้นอยู่กับคุณภาพหรือเกรดของแกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เลือกใช้ และเป็นสัดส่วนกับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W_h = K_1 f B^n \quad (2.29)$$

โดยที่

K_1 คือ ค่าคงที่

n มีค่าเท่ากับ 1.6 - 2.5

การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนเหล็กเป็นตัวนำไฟฟ้า และในทำนองเดียวกันก็เป็นตัวนำเส้นแรงแม่เหล็กด้วยการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก จากการเกิดการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กเป็นเหตุให้เกิดการไหลของกระแสในแกนเหล็กกระแสนี้เรียกว่า กระแสไหลวน ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และเกิดความร้อนขึ้นติดตามมา การลดการสูญเสียจากกระแสไหลวนสามารถทำได้โดย การใช้แกนเหล็กประกอบจากเหล็กแผ่นบางๆ และแผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะต้องเคลือบด้วยฉนวนกำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน จะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความหนาของแผ่นเหล็กแต่ละแผ่น และกำลังสองของความถี่แรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$W_e = K_2 f^2 B^2 b_s^2 \quad (2.30)$$

โดยที่

K_2 คือ ค่าคงที่

b_s คือ ความหนาแน่นของแผ่นเหล็ก

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} W_c &= W_h + W_e \\ &= K_1 f B^n + K_2 f^2 B^2 b_s^2 \end{aligned} \quad (2.31)$$

การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดในทางปฏิบัติ

ในทางปฏิบัติการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย สามารถกำหนดหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ขณะไม่มีโหลดได้ จากน้ำหนักรวมของแกนเหล็ก และข้อมูลกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนัก โดยนำมาจากเส้นโค้งแสดงคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss Curve) ของผู้ผลิตแกนเหล็ก ดังนั้น จากพารามิเตอร์ดังกล่าว สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดได้ตามสมการ

$$W_c = K_3 W_t W_m \quad (2.32)$$

โดยที่

K_3 คือ แฟกเตอร์ที่ทำให้การสูญเสียขณะไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น

W_t คือ น้ำหนักรวมของแกนเหล็ก

W_m คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อน้ำหนักของแกนเหล็ก 1 กก.

แฟกเตอร์ K_3 หาได้จากการปฏิบัติและทดลอง ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสาเหตุต่อไปนี้

- พื้นที่หน้าตัดของขาแกนเหล็กและโยค มีการกระจายของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไม่เท่ากัน
- แรงกลที่มีผลทำให้แผ่นเหล็กเกิดการบอบช้ำ
- ผลจากรอยต่อ (Joints) ในเส้นทางของเส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทักษะ (Skill) และความสามารถของแรงงานในการจัดเรียงแผ่นเหล็ก

สำหรับความถูกต้องแม่นยำของการคำนวณนั้น นอกจากจะคำนวณน้ำหนักรวมของแกนเหล็กได้ถูกต้อง และกำหนดแฟคเตอร์กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่ม(K_3) ได้อย่างเหมาะสมแล้ว การใช้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมีความสำคัญยิ่ง

เส้นโค้งแสดงลักษณะกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก เป็นเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ซึ่งวิศวกรผู้ออกแบบมักจะกำหนดค่าประมาณคงที่ค่าหนึ่ง ไม่ว่าจะความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม ดังนั้น จะมีผลทำให้ผลการทดลองกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลดกับผลของการคำนวณจากการออกแบบไม่ตรงกัน และอาจผิดพลาดมากกว่าความคลาดเคลื่อน (Tolerance) ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

2. กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด (Load Loss)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดในหม้อแปลงอาจเรียกว่า การสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper Losses) ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในขดลวดของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลด ซึ่งจะประกอบด้วย การสูญเสียจากส่วนต่างๆ ดังนี้

- การสูญเสียในขดลวด เนื่องจากกระแสขณะจ่ายโหลด
- การสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ในขดลวดเนื่องจากเส้นแม่เหล็กรั่วไหล (Leakage Flux) และการสูญเสียปลีกย่อย (Stray Losses) ในขดลวดแกนเหล็กและอุปกรณ์ที่จับยึดโครงสร้างของหม้อแปลง

ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$P_C = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (2.33)$$

โดยที่

P_C คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของขดลวดทองแดง

I_1 และ R_1 คือ กระแสและความต้านทานของขดลวดแรงสูง

I_2 และ R_2 คือ กระแสและความต้านทานของขดลวดแรงต่ำ

ค่าความต้านทานของขดลวด สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$R = \rho \frac{LN}{a_w} \quad (2.34)$$

โดยที่

ρ = ความต้านจำเพาะ (Specific Resistance) ของตัวนำ

L = ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวด

N = จำนวนรอบของขดลวด

a_w = พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด และการสูญเสียปลีกย่อย สามารถหาได้จาก การปฏิบัติและทดลอง โดยกำหนดเป็นแฟคเตอร์ของการสูญเสีย I^2R ในขดลวด(K_4) มีค่าประมาณ 8% ของการสูญเสีย I^2R ในขดลวด ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$P_L = P_C + K_4 P_C \quad (2.35)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงจำหน่ายตามข้อกำหนดจะอ้างอิงที่อุณหภูมิเท่ากับ 75°C

รีแอกแตนซ์รั่ว (Leakage Reactance)

การประมาณค่ารีแอกแตนซ์รั่วคือ การประมาณการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กรั่ว (Leakage Flux) และผลของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีต่อขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ

สนามแม่เหล็กรั่วประกอบด้วยสนามแม่เหล็ก 2 ส่วนดังนี้

1. สนามแม่เหล็กในร่องน้ำมัน(Oil Duct) ระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ มีค่าคงที่ และมีความเข้มข้นสม่ำเสมอโดยมีเส้นแรงแม่เหล็กไปตามแนวตั้ง (Longitudinal Flux)
2. สนามแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กคล้องขดลวด(Flux Linking) โดยมีความเข้มข้นลงเป็นเชิงเส้น(Linearly) จากค่าสูงสุดจนกระทั่งเป็นศูนย์ที่พื้นผิวภายนอกและภายในของขดลวดแรงสูงและขดลวดแรงต่ำ

เมื่อพิจารณาจากภาพ เพอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์รั่วระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$X = \{ 2\pi f \mu_0 l_{mt} AT / (l E_t) \} \times [a + (b_1 + b_2) / 3] \times 100 \quad (2.36)$$

โดยที่

μ_0 คือ ความซาบซึมได้สัมบูรณ์(Absolute permeability) มีค่าเท่ากับ

$$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

l_{mt} คือ ความยาวรอบเฉลี่ยของขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ(เมตร)

AT คือ แอมแปร์ - รอบ (Ampere-turns) ของขดลวดต้นแรงต่ำ

l คือ ความยาวตามแนวแกนขดลวด(เมตร)

E_t คือ แรงดันต่อรอบ

a คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงและแรงต่ำ(เมตร)

b_1 คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงต่ำ(เมตร)

b_2 คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวดแรงสูง(เมตร)

3. อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short Circuit Impedance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ลัตววงจรของหม้อแปลงคือ ผลรวมทางเวกเตอร์ของเปอร์เซ็นต์ความต้านทาน (Percentage resistive drop) และเปอร์เซ็นต์รีแอกแตนซ์(Percentage reactive drop)ในขดลวด หม้อแปลง สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\% Z = \sqrt{(\%R^2 + \%X^2)} \quad (2.37)$$

โดยที่

%R คือ Percentage resistive

%X คือ Percentage reactive

4. โวลท์เตจเรกูเลชัน (Voltage Regulation)

ค่าโวลท์เตจเรกูเลชันของหม้อแปลงจะกำหนดโดยอัตราส่วนของขนาดแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตขณะไม่มีโหลดและขณะจ่ายโหลดที่พิกัดที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ใดๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\% \text{ Regulation} = (R\cos\theta + X\sin\theta) + \{(X\cos\theta - R\sin\theta)^2 / 200\} \quad (2.38)$$

โดยที่

R คือ Percentage resistive drop

X คือ Percentage reactive drop

$\cos\theta$ คือ Lagging power factor

5. ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

สามารถหาได้ดังสมการ

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \times 100 \quad (2.39)$$

หรือ

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{\text{Input} - \text{Losses}}{\text{Input}} \times 100 \quad (2.40)$$

หรือ

$$\% \text{ Efficiency} = \left(1 - \frac{\text{Losses}}{\text{Input}}\right) \times 100 \quad (2.41)$$

6. กระแสลัตววงจร(สมมาตร)ของหม้อแปลง

สามารถหาได้ดังสมการ

$$I_{sc}(sym) = \frac{I_{LV}(rated)}{\%Z} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การออกแบบตัวถังและครีบบระบายความร้อนของหม้อแปลง

(Transformer Tank and Cooling Fins Design)

การออกแบบตัวถังหม้อแปลง (Transformer Tank Design)

ตัวถังของหม้อแปลง จะสร้างจากเหล็กที่มีความหนาประมาณ 2 - 9 มม. ขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง ขนาดของถังหม้อแปลงจะถูกกำหนดโดยขนาดของแกนเหล็กและขดลวดของหม้อแปลงและระยะห่างระหว่างขดลวดกับส่วนที่ต่อลงดินของหม้อแปลง ขนาดของถังหม้อแปลงสามารถหาได้ดังนี้สมการ

1. ความกว้างของถังหม้อแปลง(T_w) สามารถหาได้ดังสมการ

$$T_w = \phi_{HV} + 2\Delta_w + \Delta_c \quad (2.43)$$

โดยที่

ϕ_{HV} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอกของขดลวดแรงดันสูง(มม.)

Δ_w คือ ระยะที่เผื่อไว้สำหรับสายตัวนำระหว่างแท็บและระหว่างขดลวดแรงดันต่ำกับบushingแรงต่ำ(มม.)

Δ_c คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดแรงสูงกับตัวถังหม้อแปลง(มม.)

2. ความยาวของถังหม้อแปลง(T_L) สามารถหาได้ดังสมการ

$$T_L = 2h_j + 2a_j + \phi_{HV} + 2\Delta_c \quad (2.44)$$

3. ความสูงของถังหม้อแปลง(T_H) สามารถหาได้ดังสมการ

$$T_H = b_j + \Delta_H \quad (2.45)$$

โดยที่

Δ_H คือ ระยะความสูงของชุดประกอบหม้อแปลงกับฝาถังหม้อแปลง(มม.)

การออกแบบครีบบระบายความร้อน (Cooling Fins Design)

เมื่อพื้นที่ผิวของถังเรียบ ไม่สามารถระบายความร้อนของหม้อแปลงให้มีอุณหภูมิเป็นไปตามข้อกำหนดได้ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงต้องทำการติดตั้งครีบบระบายความร้อน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการระบายความร้อน การหาพื้นที่ผิวของการระบายความร้อนสามารถหาได้ดังนี้

1. พื้นที่ผิวการระบายความร้อนของตัวถังผิวเรียบ(A_T) สามารถหาได้ดังสมการ

$$A_T = 2T_H(T_L + T_w) \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พื้นที่ผิวการระบายความร้อนทั้งหมด
3. พื้นที่ผิวของครีประบายความร้อน(A_F) ที่ต้องการติดตั้งเพิ่ม สามารถหาได้ดังสมการ

$$A_F = A_R - A_T \quad (2.47)$$

ชนิดของครีประบายความร้อนนั้นสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ ครีประบายความร้อนชนิดแผ่น (Radiator Fin) และครีประบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(Corrugated Fin) การหาขนาดความกว้างและความสูงของครีในแต่ละชนิดนั้น ผู้ออกแบบจะต้องทำการพิจารณาเลือกขนาดของครีให้เหมาะสมกับขนาดของตัวถังหม้อแปลง และให้มีความสัมพันธ์กับขนาดการผลิตของโรงงานผู้ผลิต ดังนั้นจำนวนแผ่นครีประบายความร้อนชนิดแผ่นสามารถหาได้ดังสมการ

$$F_{NR} = A_F / (F_{WR} \times F_{HR}) \quad (2.48)$$

โดยที่

F_{NR} คือ จำนวนแผ่นครีประบายความร้อนชนิดแผ่น

F_{WR} คือ ความกว้างของครีประบายความร้อนชนิดแผ่น(มม.)

F_{HR} คือ ความสูงของครีประบายความร้อนชนิดแผ่น(มม.)

ในส่วนของการหาจำนวนลอนครีประบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(Corrugated Fin) สามารถหาได้ดังนี้

1. ด้านความยาวของตัวถังจำนวนลอนครีประบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูกสามารถหาได้ดังสมการ

$$F_{NCL} = (T_L - 2\Delta_L) / \Delta_D \quad (2.49)$$

โดยที่

F_{NCL} คือ จำนวนลอนครีประบายความร้อนด้านความยาวของตัวถัง

Δ_L คือ ระยะปลายที่เหลือของครีประบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูก(มม.)

Δ_D คือ ระยะห่างระหว่างลอนครี(มม.)

2. ด้านความกว้างของตัวถังจำนวนลอนครีประบายความร้อนชนิดลอนลูกฟูกสามารถหาได้ดังสมการ

$$F_{NCW} = (T_W - 2\Delta_L) / \Delta_D \quad (2.50)$$

โดยที่

F_{NCW} คือ จำนวนลอนครีประบายความร้อนด้านความกว้างของตัวถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจำนวนลอนครีประบายความร้อนทั้งหมด(F_{NCT}) หาได้ดังสมการ

$$F_{NCT} = 2F_{NCL} + 2F_{NCW} \quad (2.51)$$

2.3 การหาอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

2.3.1 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง

ในการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจำหน่าย สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด(Average winding temperature rise) สามารถหาได้จากสมการ

$$\Theta_{wr} = \Theta_{w2} - \Theta_a \quad (2.52)$$

$$\Theta_{w2} = \frac{Rt_2}{Rt_1} (k + \Theta_{w1}) - k \quad (2.53)$$

โดยที่

Θ_{wr} คือ อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด, °C

Θ_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม, °C

Θ_{w2} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่จุดตัดไฟ, °C

R_{t1} คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิแวดล้อม, 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

$$\Theta_{or} = \Theta_o - \Theta_a \quad (2.54)$$

2.4 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงขณะลัดวงจร

ในการวิเคราะห์สภาวะลัดวงจรของหม้อแปลงต้องทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

- 2.4.1 การคำนวณระยะเวลาการลัดวงจร (Short-Circuit Current Duration) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t = \frac{1250}{I^2} \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

t คือ ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)

$I = \frac{I_{sc}}{I_R}$ คือ กระแสลัดวงจรสมมาตรซึ่งเป็นค่าทวิคูณของกระแสปกติ

หมายเหตุ

สมการที่ (2.55) ใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดไม่เกิน 500 kVA ส่วนหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ระยะเวลาในการลัดวงจรจะไม่เกิน 2 วินาที ตามค่ามาตรฐาน

2.4.2 การคำนวณกระแสลัดวงจร (Short circuit current calculation) สามารถแบ่งการคำนวณได้ดังนี้

1. กระแสสมมาตร (Symmetrical Current) สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC} = \frac{I_R}{z_T + z_S} \quad (2.56)$$

โดยที่

I_R คือ กระแสที่พิกัด(A)

Z_T คือ อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็นค่าเปอร์ยูนิต

Z_S คือ อิมพีแดนซ์ของระบบเป็นค่าเปอร์ยูนิต

หมายเหตุ

ในบทความนี้จะกล่าวถึงการลัดวงจรที่ขั้วของหม้อแปลงโดยไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ (กระแสลัดวงจรมีค่าสูงสุด)

2. กระแสไม่สมมาตร (Asymmetrical current) สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC(pkasym)} = KI_{SC} \quad (2.57)$$

โดยที่

$$K = [1 + (e^{-(\phi + \pi/2)r/x} \sin \phi)] \sqrt{2}$$

และ

e คือ base of nature logarithm ≈ 2.718

ϕ คือ arctan x/r , in radian

x/r คือ อัตราส่วนของผลของกระแสลัดต่อค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทาน

2.4.3 การคำนวณอุณหภูมิของขดลวดขณะลัดวงจร

อุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะที่การลัดวงจรสิ้นสุด (T_f) สามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_f = (T_k + T_S) \cdot m(1 + E + 0.6m) + T_S \quad (2.58)$$

โดยที่

$$m = \frac{(w_s)t}{C(T_k + T_S)} \quad (2.59)$$

สมการที่ 2.59 จะเป็นสูตรโดยประมาณที่ใช้ในกรณีที่ค่า $m = 0.6$ และน้อยกว่า สำหรับค่า m ที่มีค่ามากกว่า 0.6 ค่า T_f สามารถหาได้จากสมการ

$$T_f = (T_k + T_S) \left[\sqrt{e^{2m} + E(e^{2m} - 1)} - 1 \right] + T_S \quad (2.60)$$

โดยที่

t คือ ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)

T_k คือ 234.5 สำหรับทองแดง

คือ 225 สำหรับอลูมิเนียม

T_S คือ อุณหภูมิขณะเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$) โดยจะมีค่าดังนี้

(1) 30°C ค่าอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temp.) บวกกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดบวกกับอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่ยอมรับได้ (จาก spec. ของโรงงาน) หรือ

(2) 30°C ค่าอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temp.) บวกกับค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่เพิ่มขึ้นของขดลวดตามข้อกำหนด (specification) ของหม้อแปลงแต่ละชนิด

$$E = E_r \left[\frac{T_k + T_r}{T_k + T_S} \right]^2 \quad (2.61)$$

E_r คือ per-unit eddy current loss ที่อุณหภูมิอ้างอิง

T_r คือ อุณหภูมิอ้างอิง (อุณหภูมิแวดล้อม 20°C บวกกับอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่พิกัด)

W_S คือ Short-Circuit resistance loss ของขดลวดที่อุณหภูมิเริ่มต้น; วัตต์/ปอนด์ ของวัสดุตัวนำ

$$W_S = \frac{W_r N^2}{M} \times \left(\frac{T_k + T_S}{T_k + T_r} \right) \quad (2.62)$$

W_r คือ resistance loss ของขดลวดที่พิกัดกระแสและอุณหภูมิอ้างอิง; วัตต์

N คือ ขนาดของกระแสลัดวงจรสมมาตร; แอมป์

M คือ น้ำหนักของขดลวดตัวนำ; ปอนด์

C คือ ค่าความจุความร้อนเฉลี่ยต่อปอนด์ของวัสดุตัวนำ สามารถหาได้จากสมการสำหรับทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = 174 + 0.0225(T_S + T_f) + 110\left(\frac{A_i}{A_c}\right) \quad (2.63)$$

สำหรับอลูมิเนียม

$$C = 405 + 0.1(T_S + T_f) + 360\left(\frac{A_i}{A_c}\right) \quad (2.64)$$

โดยที่

A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของฉนวน

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

2.5 การคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC (Calculation of the Final Winding Temperature according to IEC Standard)

อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด (θ_1) ของขดลวดหลังจากการลัดวงจรสามารถหาได้จากสมการสำหรับขดลวดทองแดง

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{J^2 t} - 1 \quad (2.65)$$

สำหรับขดลวดอลูมิเนียม

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 225)}{J^2 t} - 1 \quad (2.66)$$

โดยที่

θ_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น, องศาเซลเซียส

J คือ ความหนาแน่นของกระแสขณะลัดวงจร, A/mm²

t คือ เวลาขณะลัดวงจร, วินาที

ตารางที่ 2.1 ค่าสูงสุดของอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดหลังการลัดวงจร (θ_1)

ชนิดของหม้อแปลง	ระดับชั้นอุณหภูมิของฉนวน (°C)	ค่าสูงสุดของอุณหภูมิ (θ_1)	
		ทองแดง	อลูมิเนียม
แบบจุ่มน้ำมัน	105 (class A)	250 °C	200 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงขณะลัดวงจรตามมาตรฐาน IEC (Transformer Short-Circuit Parameter According to IEC Standard)

2.6.1 กระแสลัดวงจรขณะไม่สมมาตร

กระแสลัดวงจรขณะไม่สมมาตร สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC} = \sqrt{2}x(1 + e^{\frac{-\pi R}{X}})x(\frac{I_{ph}}{Ez}) \quad (2.67)$$

โดยที่

I_{ph} คือ กระแสที่พิกัดต่อเฟส

R คือ เพอร์เซนต์ความต้านทาน

X คือ เพอร์เซนต์รีแอกแตนซ์

Ez คือ อิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิต

2.6.2 การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวรัศมี (Calculation of radial forces)

เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งตามแนวแกนกระทำกับกระแสของขดลวดเกิดขึ้นเนื่องจากแรงตามแนวรัศมี(radial force, Fr) ส่วนประกอบของเส้นแรงตามแนวรัศมีกระทำกับกระแสของขดลวดเกิดขึ้นเนื่องจากแรงตามแนวแกน (axial force, Fa) แรงทั้งสองนี้จะทำให้ขดลวดเสียหาย ในการใช้งานหม้อแปลงปกติทั่วไป แรงทั้งสองนี้มีค่าน้อยมาก แต่ถ้าหม้อแปลงเกิดสภาวะลัดวงจร กระแส และแรงทางแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นกระแสลัดวงจรจะถูกคำนวณเมื่อทำการออกแบบหม้อแปลง แรงขณะลัดวงจรตามแนวรัศมี สามารถหาได้จากสมการ

$$F_{rad} = \pi \cdot 0.028 \times \left(\frac{N \times I^2}{H_w} \right) \times 10^{-6} \times \left(\frac{r}{D_m} \right)^2 \times 10^{-6} \quad (2.68)$$

โดยที่

D_m คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวด (มม.)

H_w คือ ความยาวเฉลี่ยทางเรขาคณิตของขดลวด (มม.)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

I คือ กระแสประสิทธิผลของขดลวด

$r = \frac{1}{EZ}$ คือ ตัวประกอบกระแสเกิน

$k = \left(1 + e^{\frac{-\pi R}{X}} \right)$ คือ ตัวประกอบแอมป์ริจูดสูงสุด

2.6.3 การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวแกน (Calculation of axial forces)

ค่าของแรงตามแนวแกนขณะทำการทดสอบการทนการลัดวงจร สามารถหาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_{ax} = 0.628 \times \left(\frac{N \times I}{H^2 w} \right)^2 \times \frac{2k}{3} \left(1 + \frac{a_1 + a_2}{k} \right) \times (10)^2 \times (\sqrt{\quad})^2 \times 10^{-6} \quad (2.69)$$

โดยที่

d คือ ความกว้างของท่อน้ำมันระบายความร้อนหลัก

a₁, a₂ คือ ความกว้างตามแนวรัศมีของขดลวด

2.6.4 การคำนวณค่าของฮูปลสเตอร์ส (hoop stress) ขณะทดสอบการทนการลัดวงจร สามารถหาได้ดังนี้

$$\sigma_t = 0.314 \times \left(\frac{N \times I}{Hw} \right) \times D_m \times J \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (2.70)$$

โดยที่

σ_t คือ ฮูปลสเตอร์ส (N/mm²)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

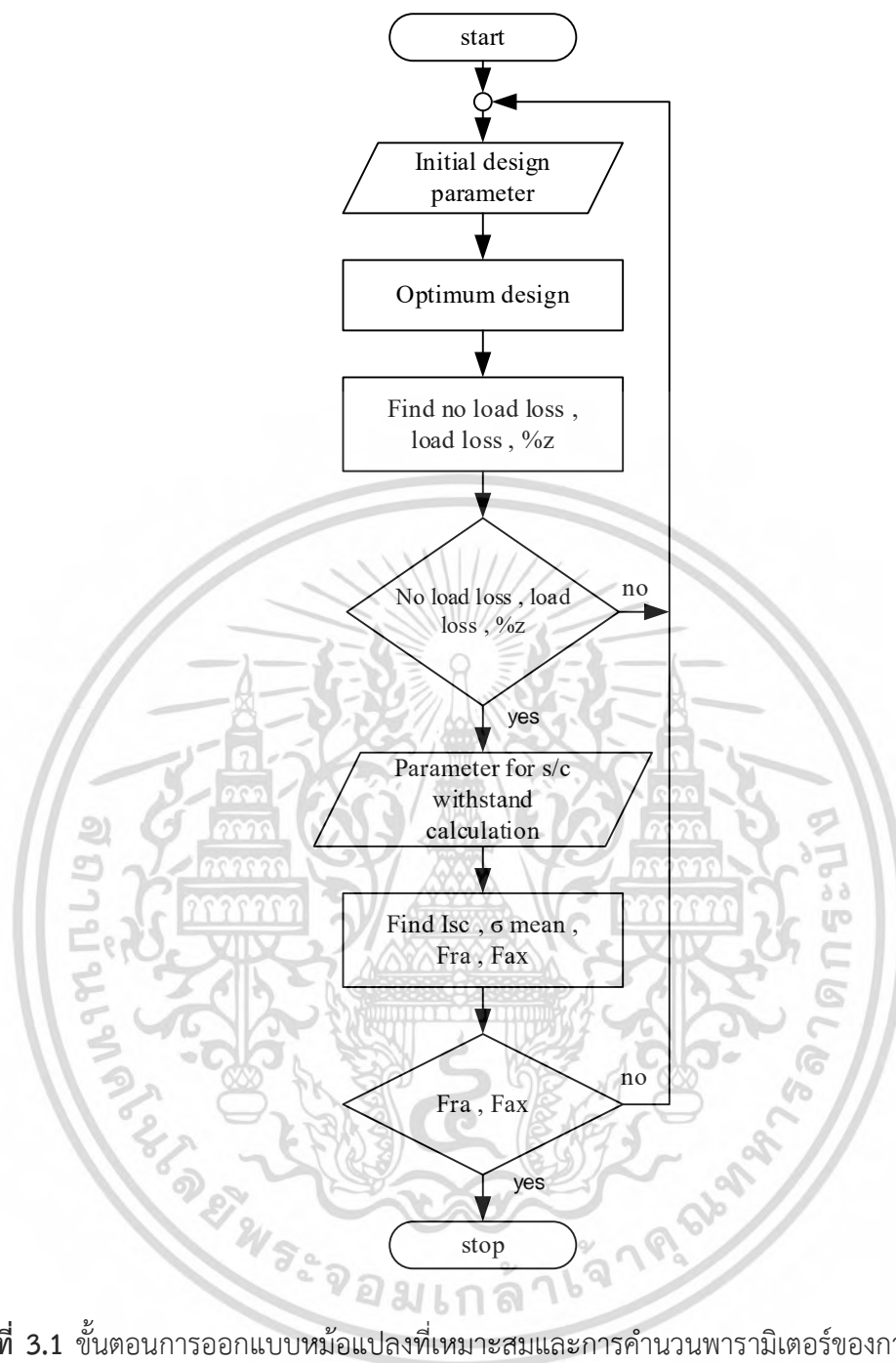
บทที่ 3

ขั้นตอนการออกแบบและการทดสอบหม้อแปลง

ในบทนี้จะแสดงขั้นตอนการออกแบบ เทคนิคใหม่ในการปรับพารามิเตอร์ และการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วย การทดสอบประจำ การทดสอบเฉพาะแบบ และการทดสอบพิเศษ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลง

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้านั้นวิศวกรผู้ออกแบบจะทำการศึกษาข้อกำหนดรายละเอียด (Specification) ของหม้อแปลงและข้อมูลต่างๆ ก่อนทำการออกแบบเพื่อที่จะให้ได้ผลลัพธ์ของการออกแบบและนำไปผลิตหม้อแปลงจริงได้คุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานและตามความต้องการในการใช้งานขั้นตอนการออกแบบ และวิเคราะห์พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย จะเริ่มจากการนำข้อมูลเริ่มต้นของการออกแบบ มาทำการคำนวณออกแบบพื้นที่หน้าตัดและส่วนประกอบต่างๆของแกนเหล็ก ออกแบบขดลวดและฉนวนและส่วนประกอบต่างๆ ทำการคำนวณหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดและความสูญเสียขณะมีโหลดที่พิกัดค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ ประสิทธิภาพ และโวลต์เตจเรกูเลชัน เมื่อได้ผลลัพธ์ของการออกแบบเป็นไปตามข้อกำหนดแล้วจึงจะทำการคำนวณ และวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการทนการลัดวงจร และคำนวณหาแรงขณะลัดวงจรตามเทคนิคใหม่ที่นำเสนอ โดยจะมีการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น การปรับพื้นที่หน้าตัดแกนเหล็ก เส้นผ่าศูนย์กลางแกนเหล็ก ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก การเลือกขนาดลวดสำหรับพันคอยล์ การเลือกค่าความหนาแน่นกระแส การเลือกฉนวนในส่วนต่างๆ เป็นต้น ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงทั้งสิ้น ตัวอย่างเช่นการเลือกขนาดของขดลวดก็จะส่งผลกระทบต่อแรงขณะลัดวงจร และยังส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของขดลวดขณะจ่ายโหลด และขณะลัดวงจรด้วยเงื่อนไขของการออกแบบตามเทคนิคใหม่คือ จะต้องออกแบบให้หม้อแปลงมีค่าความสูญเสียเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ เป็นไปตามข้อกำหนดของ PEA ค่าของแรงขณะลัดวงจรและอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะลัดวงจรจะต้องมีค่าต่ำกว่าการออกแบบในแบบเดิม การคำนวณและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการออกแบบหม้อแปลงที่เหมาะสมและการคำนวณพารามิเตอร์ของการทดสอบการทนการลัดวงจร

3.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การทดสอบเป็นสิ่งที่สำคัญ เพื่อเป็นเครื่องยืนยันถึงคุณภาพของการวิเคราะห์ออกแบบ และคุณภาพของการสร้างหรือผลิต หม้อแปลงจำหน่ายที่สร้างหรือผลิตขึ้นก็เช่นกันคือจะต้องทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของหม้อแปลงจำหน่ายว่าเป็นไปตามข้อกำหนดหรือไม่ และเพื่อทำการตรวจเช็คระบบ และอุปกรณ์ต่างๆ ของหม้อแปลงด้วยว่าสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย ทนต่อภาวะการณ์ต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น การทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การทดสอบประจำ (Routine Test)

การทดสอบประจำนี้หม้อแปลงจำหน่ายที่ผลิตหรือสร้างขึ้นจะต้องผ่านการทดสอบประจำทุกเครื่อง ลักษณะของการทดสอบให้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิแวดล้อม(Ambient Temperature) ระหว่าง 10 - 40 °C ผลของการทดสอบให้ปรับผลการทดสอบไปที่อุณหภูมิอ้างอิงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิอ้างอิงของการปรับผลการทดสอบ

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

การทดสอบประจำมีรายละเอียดในการทดสอบดังนี้

การวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Measurement of winding resistance)

สามารถแบ่งการวัดได้ 2 ลักษณะดังนี้

1. วัดค่าความต้านทานทางด้านแรงดันสูง

จะทำการวัดค่าความต้านทานที่ขั้วของหม้อแปลงทางด้านแรงดันสูง ที่แท็ปใช้งานปกติ (Nominal Tap) เพื่อนำค่าที่ได้ไปเป็นส่วนประกอบในการคำนวณหาค่าความสูญเสียขณะจ่ายโหลด โดยจะทำการวัดทั้ง 3 เฟส (กรณีที่เป็นหม้อแปลงสามเฟส) แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย

2. วัดค่าความต้านทานทางด้านแรงดันต่ำ

กรณีที่เป็นหม้อแปลงสามเฟสจะทำการวัดค่าความต้านทานทั้ง 3 เฟส แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย และในกรณีที่เป็นหม้อแปลงหนึ่งเฟส(4 ขั้ว) จะทำวัดค่าความต้านทาน ของขดลวดทั้งสอง(ขั้ว a1-a2 และ b1-b2)

การวัดค่าอัตราส่วนแรงดัน และตรวจสอบสัญลักษณ์เฟส หรือเวกเตอร์กรุป

(Measurement of voltage ratio and check of phase displacement)

การวัดอัตราส่วนจำนวนรอบ เป็นการวัดหาค่าอัตราส่วนจำนวนรอบระหว่าง ขดลวดแรงดันสูง และขดลวดแรงดันต่ำ โดยการทดสอบทุกแท็ปของการใช้งานของทุกเฟสและเวกเตอร์กรุป ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือวัด Transformer Ratio Meter หรือทำการป้อนแรงดันทางด้านแรงสูง แล้วใช้โวลต์มิเตอร์วัดค่าแรงดันทั้งทางด้านแรงสูงและแรงต่ำแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราส่วน(Ratio) ค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ $\pm 0.5\%$

การวัดค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรและค่าความสูญเสียขณะจ่ายโหลดที่พิกัด (Measurement of short-circuit impedance and load loss)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียขณะจ่ายโหลด(Load Losses), อิมพีแดนซ์ลัดวงจร, โวลต์เตจเรกูเลชันและประสิทธิภาพของหม้อแปลงที่พิกัดกระแส การทดสอบทำได้โดยป้อนแรงดันจนได้ค่ากระแสที่พิกัดแล้ววัดค่าต่างๆ ทางด้านแรงดันสูง และทำการลัดวงจร(Short Circuit) ทางด้านแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (Measurement of no-load loss)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด, กระแสขณะไม่มีโหลด ของหม้อแปลง ที่พิกัดแรงดัน(Rated Voltage) การทดสอบทำได้โดยป้อนแรงดันที่พิกัดแล้ววัดค่าต่างๆ ทางด้านแรงดันต่ำโดยทางด้านแรงดันสูงทำการเปิดวงจร

การทดสอบประจำไดอิเล็กตริก (Dielectric routine test)

สามารถแยกหัวข้อการทดสอบได้ดังนี้

1. การวัดค่าความต้านทานฉนวน (Measurement of insulation resistance)

วัดระหว่างจุดต่าง ๆ ดังนี้

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

จุดประสงค์การทดสอบหาค่าความต้านทานฉนวนระหว่างจุดต่างๆ ของหม้อแปลงเพื่อตรวจเช็คความชื้นที่อยู่ภายในหม้อแปลง ถ้ามีความชื้นมากค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงจะมีค่าน้อยและถ้ามีความชื้นน้อยค่าความต้านทานฉนวนของหม้อแปลงจะมีค่ามาก ค่าความต้านทานฉนวนที่ทดสอบได้จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความต้านทานฉนวน (เมกกะโอห์มมิเตอร์ 1000 V หรือ 2000 V)

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

2. การทดสอบความคงทนแรงดันจากแหล่งจ่ายอื่น(Separate-source voltage withstand test)

สามารถแบ่งการทดสอบได้ 2 ลักษณะคือ

2.1 Applied Voltage Test หรือ High Potential Test

เป็นการทดสอบฉนวนที่กั้นระหว่างขดลวดแรงสูงกับขดลวดแรงต่ำ, ขดลวดแรงสูงกับกราวด์, ขดลวดแรงต่ำกับกราวด์และส่วนต่างๆ กับกราวด์การทดสอบแบ่งได้เป็นการทดสอบทางด้านแรงดันสูงและการทดสอบทางด้านแรงดันต่ำโดยทำการป้อนแรงดันทดสอบตามระดับแรงดันของหม้อแปลง ดังตารางที่ 3.3 การทดสอบให้คงค่าแรงดันทิ้งไว้เป็นเวลา 60 วินาที แล้วลดแรงดันทดสอบลงอย่างรวดเร็ว ฉนวนของหม้อแปลงในส่วนต่างๆ จะต้องไม่เสียหาย การทดสอบจะถือว่าผ่านเกณฑ์เมื่อแรงดันทดสอบไม่ล้มเหลว

ตารางที่ 3.3 ระดับการฉนวนและระยะห่างในอากาศวัดจากส่วนที่มีไฟฟ้าของบushing

แรงดันสูงสุด (kV r.m.s.)	แรงดันทนที่กำหนด		ระยะห่างในอากาศ ต่ำสุด (mm.)
	แรงดันทนตามความถี่กำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาสั้นที่กำหนด(kV r.m.s.)	แรงดันทนอิมพัลส์ไฟฟ้าผ่าคลื่นเต็มที่กำหนด kV (peak)	
ไม่เกิน 1.1	3 ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
3.6	10	40	60
7.2	20	60	90
12	28 ²⁾	75 ²⁾	125 ²⁾
24	50	125 ³⁾	225
36	70	170 ⁴⁾	315 ⁴⁾
72.5	140	350	630
123	185	450	830
	230	550	1050
245	360	850	1600
	395	950	1800

หมายเหตุ การระบุของผู้ซื้อถ้าต้องการระดับการฉนวนสูงเป็นกรณีพิเศษแล้วแต่กรณีดังนี้

- 1) “10 kV r.m.s.” “30 kV peak” และ “25 mm.” ตามลำดับ
- 2) “34 kV r.m.s.” “95 kV peak” และ “140 mm.” ตามลำดับ
- 3) “150 kV peak”
- 4) “200 kV peak” และ “330 mm.” ตามลำดับ

2.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันเหนี่ยวนำเกิน (Induced over-voltage withstand test)

เป็นการทดสอบฉนวนระหว่างรอบของขดลวด, ฉนวนระหว่างชั้นของขดลวด, ฉนวนระหว่างคอยล์และระหว่างเฟสของขดลวด การทดสอบทำได้โดยป้อนแรงดันที่มีลักษณะคลื่นใกล้เคียงกับคลื่นชายน้่มากที่สุดที่ความถี่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดกระแสทำแม่เหล็ก (Magnetizing current) มากเกินไป การทดสอบจะต้องเพิ่มแรงดันที่ป้อนเร็วที่สุดเท่าที่เครื่องวัดอ่านได้ทันอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ จนกระทั่งถึงค่าแรงดันทดสอบ ให้คงค่าแรงดันทดสอบไว้เป็นเวลา 60 วินาที ที่ความถี่ไม่เกินสองเท่าของความถี่ที่กำหนดแล้วลดแรงดันทดสอบลงอย่างรวดเร็ว หากความถี่ที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามากกว่าสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้คำนวณช่วงเวลาที่ตรงค่าแรงดันที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามสมการที่ 3.1 โดยจะต้องมีเวลาในการทดสอบไม่น้อยกว่า 15 วินาที

$$\text{Time of test} = 120 \times \frac{f_r}{f_t} \text{ seconds} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

f_r คือ ความถี่ที่พิกัด (Hz)

f_i คือ ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (Hz)

สำหรับเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 ถ้าไม่ได้รับเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไว้แสดงว่าการทดสอบนั้นไม่มีเกณฑ์ของความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการทดสอบ

รายการ	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน
1. (ก) ความสูญเสียทั้งหมด (ข) ความสูญเสียของส่วนย่อย	+ 10% ของความสูญเสียทั้งหมด + 15% ของความสูญเสียของส่วนย่อย แต่ละส่วนโดยที่ความสูญเสียทั้งหมด ต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด
2. อัตราส่วนแรงดันขณะไม่มีโหลด	$\pm 0.5\%$ ของอัตราส่วนที่แจ้งไว้
3. อิมพีแดนซ์ลัดวงจร หากค่าอิมพีแดนซ์ $\geq 10\%$ หากค่าอิมพีแดนซ์ $< 10\%$	$\pm 7.5\%$ ของค่าที่แจ้งไว้ $\pm 10\%$ ของค่าที่แจ้งไว้
4. กระแสไม่มีโหลด	+ 30% ของค่าที่แจ้งไว้

หมายเหตุ เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนพิเศษที่แตกต่างจากที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.4 ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ผลิตกับผู้ซื้อในขั้นตอนของการซื้อขาย การผลิตหรือการทดสอบ

3.2.2 การทดสอบเฉพาะแบบ (Type Test)

การทดสอบเฉพาะนี้จะทำการทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายที่สร้างขึ้นเพียงบางเครื่องหรือตามที่ผู้ใช้ต้องการให้ทดสอบ รายละเอียดในการทดสอบมีดังนี้

การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม (Temperature rise test)

สามารถทำการทดสอบได้ 3 วิธี คือ

- วิธีต่อโหลดโดยตรง
- วิธีแบบทุแบบ
- วิธีลัดวงจร

วิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปคือวิธีลัดวงจร

การทดสอบทำได้โดยลัดวงจรทางด้านแรงดันต่ำแล้วจ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงจนกระทั่งวัตต์มิเตอร์อ่านค่าความสูญเสียได้เท่ากับค่าความสูญเสียรวมทั้งหมดของหม้อแปลงแล้วทำการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ ช่วงเวลาของการทดสอบตามจุดต่างๆ ดังนี้

- วัดอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์อย่างน้อย 2 ตัว วางที่จุดต่างๆ กัน รอบหม้อแปลงตรงระดับประมาณครึ่งหนึ่งของส่วนสูงของผิวระบายความร้อน จัดวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมมิเตอร์ให้ห่างจากผิวระบายความร้อนประมาณ 1-2 เมตร

- วัดอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน (Top Oil Temperature) ของหม้อแปลง
- วัดอุณหภูมิของขดลวด โดยใช้วิธีการคำนวณโดยการวัดค่าความต้านทานแล้วคำนวณหาอุณหภูมิตั้งสมการที่ 3.2

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (k + \theta_1) - k \quad (3.2)$$

โดยที่

θ_1 และ θ_2 คือ อุณหภูมิของขดลวด

k คือ ค่าคงที่มีค่า 235 สำหรับทองแดง และ 225 สำหรับอลูมิเนียม

การทดสอบให้ทำการทดสอบต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันส่วนบนสุดอยู่ในสถานะคงตัวกล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำมันส่วนบนสุดลดลงต่ำกว่า 1 องศาต่อชั่วโมงเป็นเวลาต่อเนื่องกัน 3 ชั่วโมง จากนั้นให้ทำการทดสอบต่อไปโดยลดกระแสทดสอบลงให้เท่ากับกระแสที่พิกัดของหม้อแปลงอีกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นให้ทำการปลดแหล่งจ่ายไฟออกแล้ววัดความต้านทานของขดลวดเทียบกับเวลาอย่างรวดเร็วแล้วนำค่าไปเขียนกราฟเพื่อหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดไฟแล้วคำนวณหาอุณหภูมิของขดลวดตามสมการที่ 3.2 ผลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันและขดลวดเป็นไปตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิเพิ่มสำหรับหม้อแปลงชนิดจุ่มในน้ำมัน

	อุณหภูมิเพิ่ม (°C)
น้ำมันส่วนบน (Top Oil)	ไม่เกิน 60
ขดลวด	ไม่เกิน 65

การทดสอบเฉพาะแบบไดอิเล็กตริก (Dielectric type test) แยกหัวข้อได้ดังนี้

- การทดสอบอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse test) ระดับแรงดันทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 3.3
- การทดสอบไดอิเล็กตริกซ้ำ การทดสอบถ้ามิได้ระบุไว้เป็นอย่างอื่นและต้องการทดสอบไดอิเล็กตริกซ้ำให้ทำการทดสอบวิธีเดียวกันกับ การทดสอบประจำ ไดอิเล็กตริก แต่ให้ลดแรงดันทดสอบลงเหลือร้อยละ 75 ของแรงดันทดสอบในตอนแรก

3.2.3 การทดสอบพิเศษ (Special Tests)

การทดสอบพิเศษนี้จะทำการทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายที่สร้างขึ้นเพียงบางเครื่องหรือตามที่ผู้ใช้ต้องการให้ทดสอบคล้ายกับการทดสอบเฉพาะแบบ รายละเอียดในการทดสอบมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดฮาร์โมนิกของกระแสไม่มีโหลด (Measurement of the harmonics of the no-load current)

โดยทำการวัดทั้งสามเฟสและให้แสดงขนาด(Magnitude) ของฮาร์โมนิกเป็นร้อยละของส่วนประกอบหลักมูล (Fundamental Component)

การวัดอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ของหม้อแปลงสามเฟส (Measurement of zero-sequence impedance on three phase transformer)

โดยวัดอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ที่ความถี่ที่กำหนดโดยแสดงค่าเป็นโอห์มต่อเฟส($3U / I$,เมื่อ U และ I คือแรงดันและกระแสที่ใช้ทดสอบตามลำดับ)

การทดสอบพิเศษไดอิเล็กตริก (Dielectric special tests)

เป็นการทดสอบความทนต่อแรงดันตามความถี่กำลังไฟฟ้าของตัวจ่ายอื่น การทดสอบถือว่าผ่านเกณฑ์ เมื่อแรงดันทดสอบไม่ล้มเหลว

การทดสอบการทนการลัดวงจร (Short circuit withstand test)

หม้อแปลงจะต้องทนต่อผลทางความร้อน และผลทางพลวัตจากการลัดวงจรภายนอกตัวถังหม้อแปลงซึ่งทำให้เกิดภาวะกระแสเกินภายในขดลวด การลัดวงจรภายนอกอาจเกิดจากการลัดวงจร 3 เฟส และการลัดวงจรลักษณะอื่นๆ เช่น

- ลัดวงจรระหว่างสาย(เส้นไฟ) กับสาย(เส้นไฟ)
- ลัดวงจรระหว่างสองสาย(เส้นไฟ) กับดิน(Earth)
- ลัดวงจรระหว่างหนึ่งสาย(เส้นไฟ) กับดิน(Earth)

สำหรับหม้อแปลงน้ำมันความสามารถทางความร้อนในการทนการลัดวงจรสามารถทดสอบได้ด้วยการคำนวณดังนี้

ค่าของกระแสลัดวงจรสมมาตร

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$I = \frac{U}{(Z_t + Z_s)\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

โดยที่

I คือ กระแสลัดวงจรสมมาตร (kA)

U คือ แรงดันที่กำหนดของขดลวดที่กำลังพิจารณา (kV)

Z_t คือ อิมพีแดนซ์ลัดวงจรที่สัมพันธ์กับขดลวดที่กำลังพิจารณา (โอห์มต่อเฟส)

Z_s คือ อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (โอห์มต่อเฟส)

$$Z_s = U_s^2 / S$$

U_s คือ แรงดันที่กำหนดของระบบไฟฟ้า (kV)

S คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏลัดวงจรของระบบไฟฟ้า (MVA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงเวลาของกระแสลัดวงจรสมมาตร
ถ้ามิได้ตกลงเป็นอย่างอื่นช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณคือ 2 วินาที

- การคำนวณหาค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด (θ_1) เกิดขึ้นที่ขดลวด**
- ค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของขดลวดก่อนการลัดวงจร (θ_0) คำนวณได้โดยบวกค่าของอุณหภูมิดังนี้
- อุณหภูมิของอากาศโดยรอบที่ยอมให้ได้มากที่สุด
 - อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามภาวะการใช้งานที่กำหนด ซึ่งวัดโดยวิธีวัดความต้านทานหรือใช้ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดสำหรับขดลวดตามประเภทวัสดุฉนวนไฟฟ้า
 - ค่าของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด(θ_1) เกิดขึ้นที่ขดลวดหลังจากการลัดวงจร ด้วยกระแสลัดวงจรสมมาตร สามารถคำนวณได้จากสมการ ในบทที่ 3
 - ค่าของ θ_1 ที่คำนวณได้ จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนด ดังตารางที่ 3.6 ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณ เนื่องจากความต้านทานเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิโดยมิได้คำนึงถึงการดูดกลืนความร้อนของวัสดุฉนวนไฟฟ้าหรือน้ำมันที่สัมผัสกับโลหะ

ตารางที่ 3.6 ค่าอุณหภูมิที่ยอมให้ได้มากที่สุดของอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดหลังการลัดวงจร ด้วยกระแสลัดวงจรสมมาตร (θ_1)

อุณหภูมิของวัสดุฉนวนไฟฟ้า ประเภท A (Class A) ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าสูงสุดของ θ_1 ($^{\circ}\text{C}$)	
	ขดลวดทองแดง	ขดลวดอลูมิเนียม
105	250	200 *

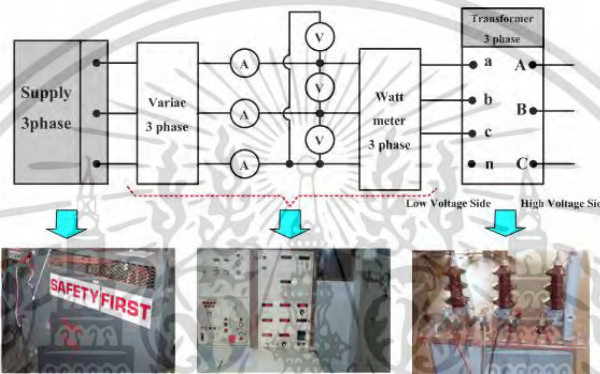
หมายเหตุ * อาจตกลงกันเป็น 250 $^{\circ}\text{C}$ ก็ได้ ถ้าโครงสร้างของขดลวดมีความแข็งแรงทางกลเพียงพอเมื่อตัวนำอยู่ในสภาพอบอุ่นเต็มที่

บทที่ 4

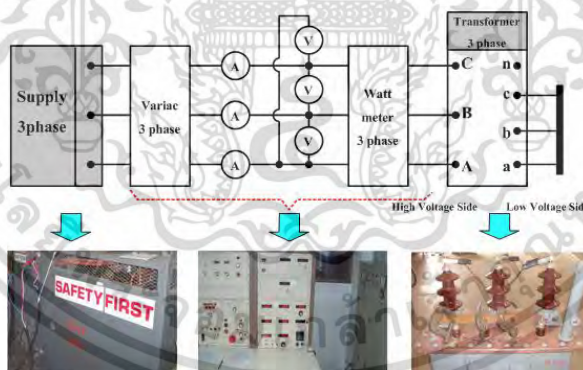
ผลจากการออกแบบ การทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้จะแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบ วิธีการทดสอบ และผลการทดสอบ หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หม้อแปลงที่นำมาทดสอบเป็นชนิด 3 เฟส 50 Hz 22000-400/230 โวลต์ Dyn 11 มีพิกัดขนาด 160 kVA, 250 kVA และ 400 kVA ผลการออกแบบและผลการทดสอบแสดงดังนี้

ในการทดสอบประจำในวิทยานิพนธ์นี้ จะทำการทดสอบหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด และขณะจ่ายโหลดที่พิกัด วงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 4.2 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดที่พิกัดโดยวิธีลัดวงจร

4.1 ผลการทดสอบประจำ

ผลสรุปคุณสมบัติทางไฟฟ้า จากการทดสอบประจำของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบตามเทคนิคใหม่ หม้อแปลงขนาด 160 kVA, 250 kVA และ 400 kVA แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบประจำหม้อแปลงไฟฟ้า 160 kVA, 250 kVA และ 400 kVA

	พิกัดหม้อแปลง		
	160 kVA	250 kVA	400 kVA
ความสูญเสียขณะไม่มีโหลด (W)	327.0	439.0	610.0
ความสูญเสียขณะมีโหลด (W)	1881.0	2686.0	3949.3
อิมพีแดนซ์ (%)	4.37	4.23	4.32

หมายเหตุ : รายละเอียดการทดสอบประจำ การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มและการทดสอบ BIL แสดงดังภาคผนวก ก และภาคผนวก ข

4.2 ผลการทดสอบค่าความสูญเสียและอุณหภูมิของหม้อแปลง 160 kVA และ 250 kVA

จากขั้นตอนในการออกแบบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ ดังแสดงในบทที่ 3 ผลลัพธ์จากการออกแบบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ รวมถึงผลการทดสอบประจำ การทดสอบเฉพาะ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับหม้อแปลงที่ได้ออกแบบไว้เดิมกับที่ได้ทำการออกแบบใหม่ โดยแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหม้อแปลงที่ออกแบบระหว่างออกแบบไว้เดิม (original regulation) กับที่ออกแบบใหม่ (new regulation) ของหม้อแปลง 160 kVA

Parameter	160 kVA	
	original regulation	new regulation
1. No Load Loss(w)		
-Guarantee	360	360
-Test	332.70	327.00
2. Load Loss(w)		
-Guarantee	2100	2100
-Test	1990.30	1881.00
3. Total loss(w)	2323.00	2208.10
4. Hottest-spot of top oil. (°C)	73.00	72.00
5. Hottest-spot of H.V.Wdg. (°C)	89.67	87.27
6. Hottest-spot of L.V.Wdg. (°C)	88.28	84.87
7. Top oil Temp rise . (°C)		
-Guarantee	60	60
-Test	47.90	43.00
8. Winding Temp rise . (°C)		
-Guarantee	65	65
-HV. Winding	61.67	60.77
-LV. Winding	60.28	58.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบหม้อแปลงที่ออกแบบระหว่างออกแบบไว้เดิม (original regulation) กับที่ออกแบบใหม่ (new regulation) ของหม้อแปลง 250 kVA

Parameter	250 kVA	
	original regulation	new regulation
1. No Load Loss(w)		
-Guarantee	500	500
-Test	478.50	439.00
2. Load Loss(w)		
-Guarantee	2950	2950
-Test	2852.00	2686.00
3. Total loss(w)	3330.50	3125.00
4. Hottest-spot of top oil. ($^{\circ}\text{C}$)	80	75.00
5. Hottest-spot of H.V.Wdg. ($^{\circ}\text{C}$)	87.10	82.44
6. Hottest-spot of L.V.Wdg. ($^{\circ}\text{C}$)	87.90	83.30
7. Top oil Temp rise . ($^{\circ}\text{C}$)		
-Guarantee	60	60
-Test	48.90	44.00
8. Winding Temp rise . ($^{\circ}\text{C}$)		
-Guarantee	65	65
-HV. Winding	56.00	51.44
-LV. Winding	56.80	52.30

4.3 พารามิเตอร์จากการออกแบบและขณะทดสอบการทนการลัดวงจร

พารามิเตอร์จากการออกแบบที่นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ขณะทดสอบการทนการลัดวงจร (short circuit withstand Test) แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์จากการออกแบบที่นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ขณะทดสอบ short circuit withstand หม้อแปลงขนาด 160 kVA

Parameter	original regulation		new regulation	
	HV side	LV side	HV side	LV side
Reactance (%)	3.70	-	4.20	-
Resistance (%)	1.20	-	1.22	-
Per unit impedance	3.89	-	0.0437	-
Resistance per phase at 75 deg. C (ohm/phase)	34.15	0.00832	36.39	0.008451
Winding height (mm) : Hw	360	385	340	340
Number of turn per limb : N	4700	47	4500	45
Current density of winding (A/mm ²) : J	2.34	2.14	2.55	1.56
Mean diameter of winding (mm) : Dm	234	162	254	176
Radial of winding 1 : a1	-	21	-	16
Radial of winding 2 : a2	28	-	36	-
Width of main duct (mm) : d	10.5		10.5	

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์จากการออกแบบที่นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ขณะทดสอบ short circuit withstand 250 kVA

Parameter	original regulation		new regulation	
	HV side	LV side	HV side	LV side
Reactance (%)	3.83	-	4.04	-
Resistance (%)	1.24	-	1.24	-
Per unit impedance	0.0398	-	0.0423	-
Resistance per phase at 75 deg. C (ohm/phase)	19.24	0.004995	20.14	0.004674
Winding height (mm) : Hw	400	425	353	375
Number of turn per limb : N	4000	40	3300	33
Current density of winding (A/mm ²) : J	2.14	2.33	2.14	2.29
Mean diameter of winding (mm) : Dm	250	174	277	195
Radial of winding 1 : a1	-	21.5	-	24
Radial of winding 2 : a2	30	-	31	-
Width of main duct (mm) : d	11		11	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการคำนวณพารามิเตอร์ขณะลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า

ผลการคำนวณพารามิเตอร์ขณะลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 160 kVA และ 250 kVA แสดงดังตารางที่ 4.6, 4.7, 4.8 และตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ด้านแรงดันสูง

Parameter	original regulation	new regulation	% difference
Asymmetrical short circuit current (A)	119.95	109.95	9.09
σ_{mean}	23.38	22.34	4.65
Radial force	715.40	657.52	8.80
Axial force	47.71	42.14	13.22
Final winding temperature($^{\circ}\text{C}$)	154.83	145.52	6.40

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 160 kVA ด้านแรงดันต่ำ

Parameter	original regulation	new regulation	% difference
Asymmetrical short circuit current (A)	11426.93	10474.51	9.09
σ_{mean}	13.19	10.66	23.73
Radial force	420.30	396.76	5.93
Axial force	26.41	24.86	6.23
Final winding temperature($^{\circ}\text{C}$)	146.18	139.39	4.87

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ด้านแรงดันสูง

Parameter	original regulation	new regulation	% difference
Asymmetrical short circuit current (A)	183.27	174.92	4.77
σ_{mean}	26.12	23.95	9.06
Radial force	1162.03	879.09	32.18
Axial force	73.69	66.14	11.42
Final winding temperature($^{\circ}\text{C}$)	144.23	139.50	3.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

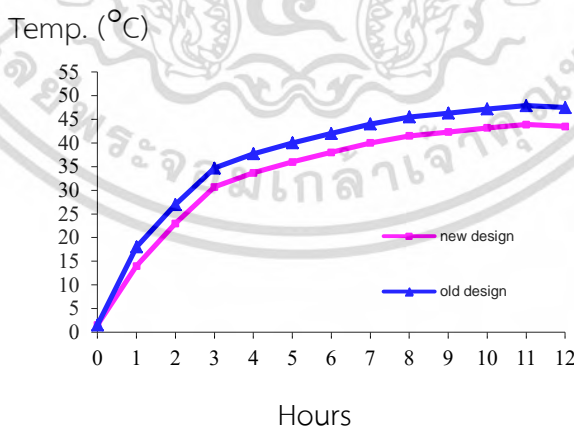
ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการทนการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 250 kVA ด้านแรงดันต่ำ

Parameter	original regulation	new regulation	% difference
Asymmetrical short circuit current (A)	17459.05	16664.06	4.77
σ_{mean}	17.75	16.18	9.70
Radial force	690.82	528.69	30.66
Axial force	41.50	37.76	9.90
Final winding temperature($^{\circ}\text{C}$)	152.01	144.80	4.98

จากตารางที่ 4.6, 4.7, 4.8 และตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าผลจากการออกแบบใหม่จะทำให้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ การทนการลัดวงจรลดลงจากการออกแบบในลักษณะเดิม ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขเทคนิคใหม่ของการออกแบบหม้อแปลงที่นำเสนอคือการออกแบบและปรับพารามิเตอร์ต่างๆ จะต้องออกแบบให้หม้อแปลงมีค่าความสูญเสีย เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ เป็นไปตามข้อกำหนดของ PEA ค่าของแรงขณะลัดวงจร และอุณหภูมิสุดท้าย ของขดลวดขณะลัดวงจรจะต้องมีค่าต่ำกว่าการออกแบบในแบบเดิม ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในตาราง จะเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจว่าผลของการออกแบบใหม่จะทำให้หม้อแปลงมีสมรรถนะ และประสิทธิภาพ ดีขึ้นและเป็นไปตามข้อกำหนด และมาตรฐานที่กำหนด

4.5 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันที่พิกัดโหลด

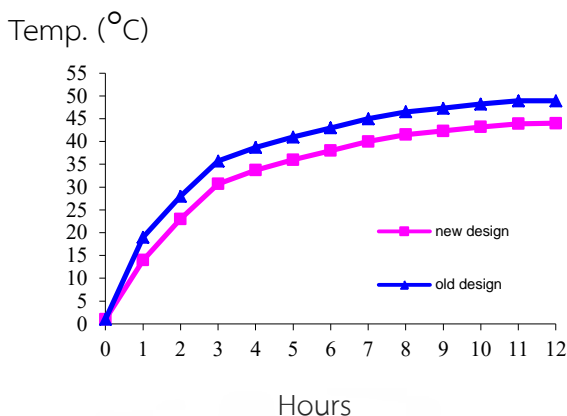
ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน 160 kVA ที่พิกัดโหลด ระหว่าง original regulation กับ new regulation แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน 160 kVA ที่พิกัดโหลด

ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน 250 kVA ที่พิกัดโหลด ระหว่าง original regulation กับ new regulation แสดงดังรูปที่ 4.4

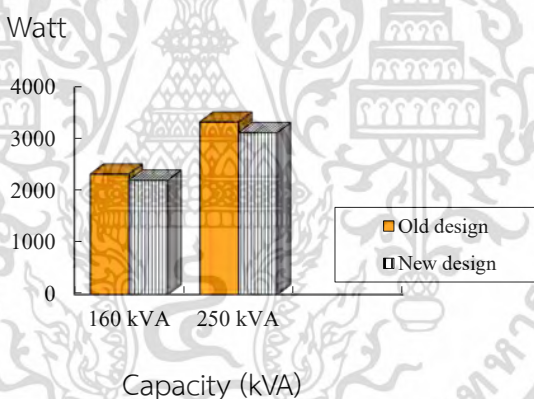
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



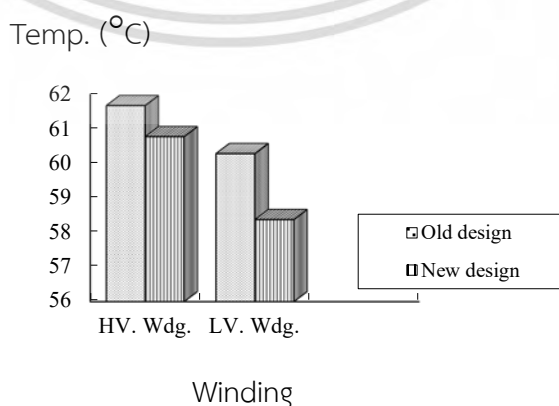
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน 250 kVA ที่พิกัดโหลด

4.6 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบค่าความสูญเสีย อุณหภูมิเพิ่มของขดลวด และน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้า

การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบค่าความสูญเสีย อุณหภูมิเพิ่มของขดลวด และน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 160 kVA and 250 kVA ระหว่าง original regulation กับ new regulation แสดงรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7, และ รูปที่ 4.8

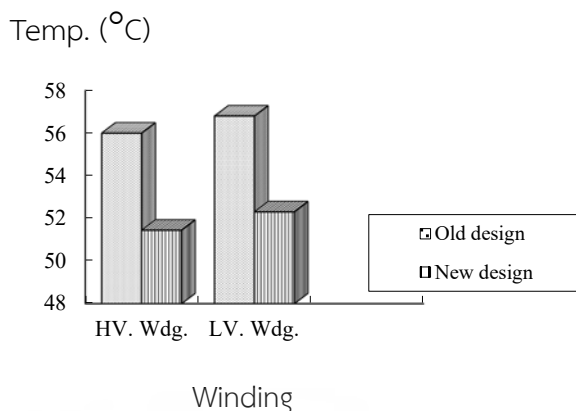


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลจากการทดสอบค่าความสูญเสียระหว่าง original regulation กับ new regulation

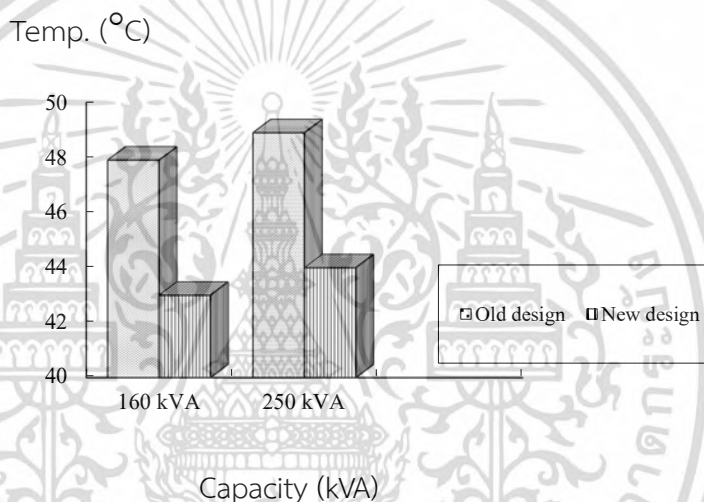


รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง 160 kVA ระหว่าง original regulation กับ new regulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง 250 kVA ระหว่าง original regulation กับ new regulation



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบหาค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน หม้อแปลงขนาด 160 kVA และ 250 kVA ระหว่าง original regulation กับ new regulation

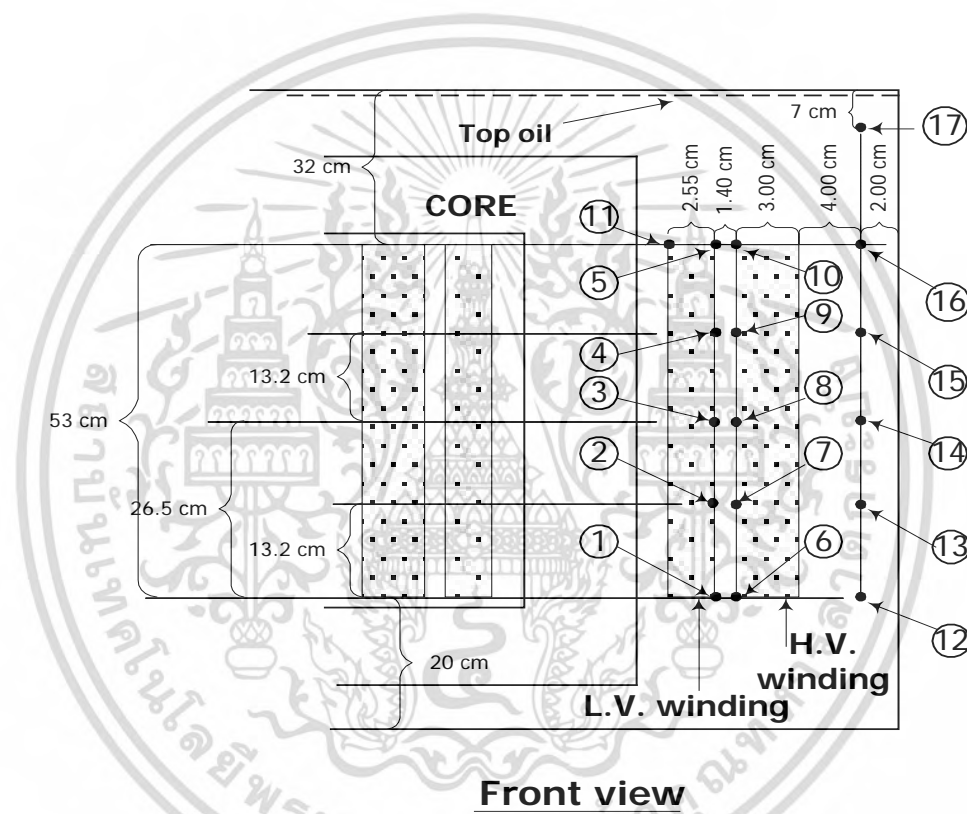
หมายเหตุ : รายละเอียดผลการทดสอบหม้อแปลงแสดงดังภาค ผนวก ก และ ภาคผนวก ข

4.7 ผลจากการออกแบบ การทดสอบ และผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 400 kVA

และในวิทยานิพนธ์นี้ ยังได้นำหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขนาด 400 kVA 3 เฟส 50 เฮิร์ต 22000-400/230 โวลต์ เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ซึ่งเป็นหม้อแปลงที่มีการใช้จำนวนมากในโรงงานอุตสาหกรรมมาทำการออกแบบและวิเคราะห์พารามิเตอร์แล้วทำการทดสอบประจำ และได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันในตำแหน่งต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 แล้วทำการทดสอบหาอุณหภูมิที่พิกัดโหลด วงจรการทดสอบ ดังรูปที่ 4.2 ข้อมูลทั่วไปของหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบ แสดงได้ดังนี้

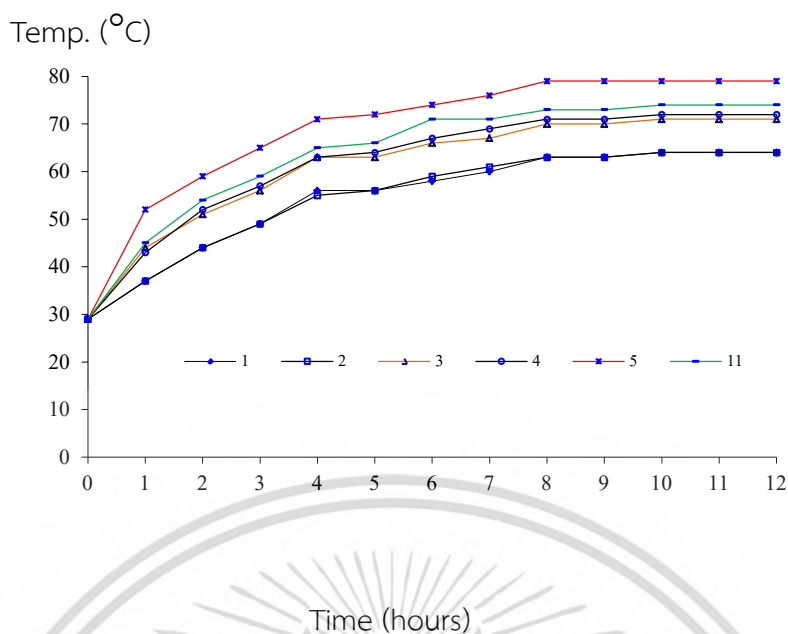
ตารางที่ 4.10 ข้อมูลทั่วไปของหม้อแปลง 400 kVA

Capacity(kVA)	400
High voltage(V)	22000
Low voltage(V)	400/230
No. of phase	3
Frequency(Hz)	50
Vector group	Dyn 11
Impedance(%)	4.0
Insulation Class	A

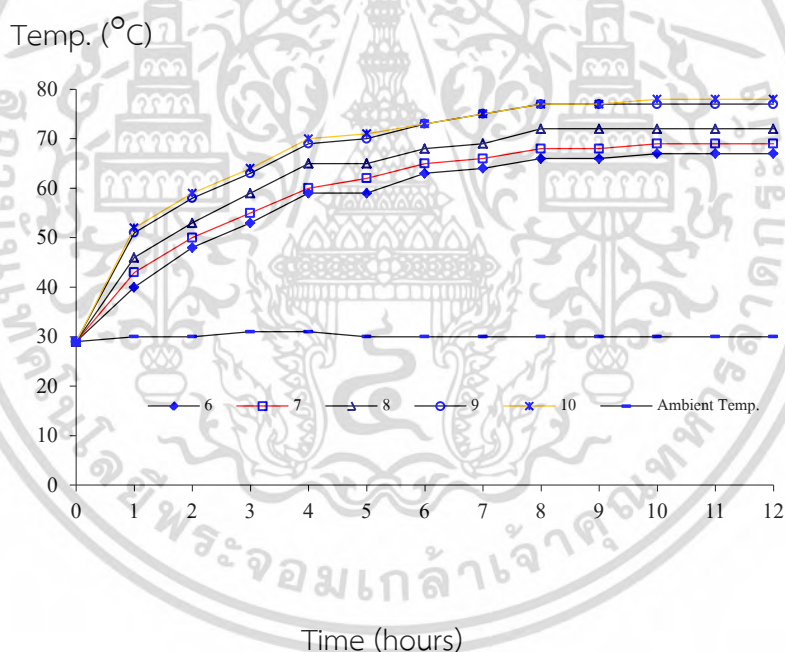


รูปที่ 4.9 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ ของหม้อแปลงที่ทดสอบขนาด 400 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

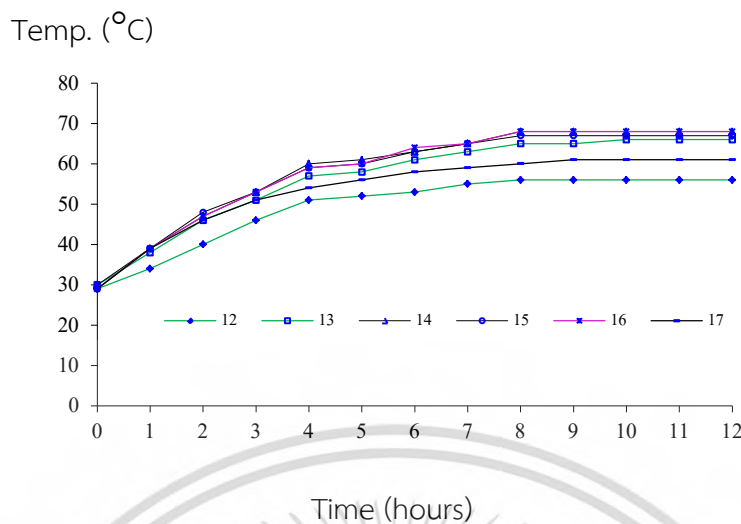


รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบอุณหภูมิขดลวดด้านแรงดันต่ำตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 11

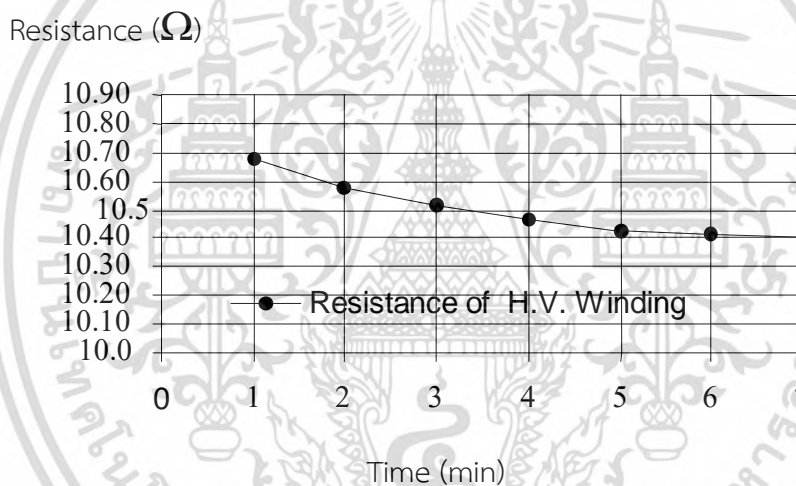


รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบอุณหภูมิขดลวดด้านแรงดันสูงตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 และอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบ

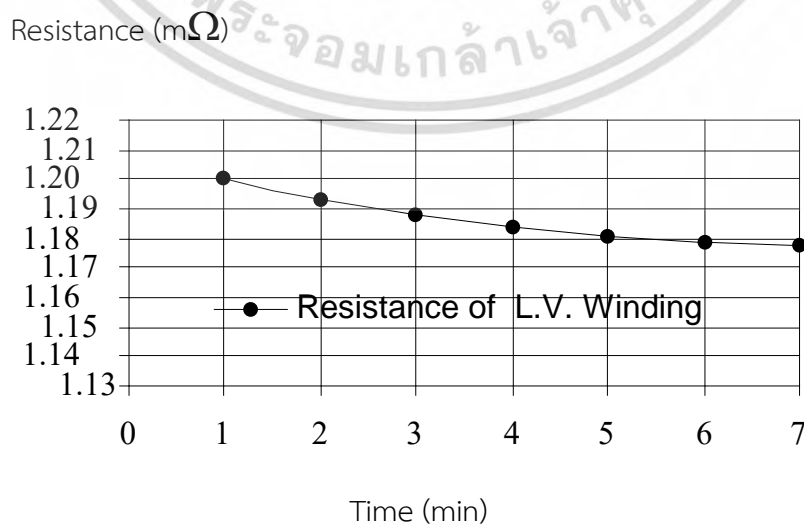
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบอุณหภูมิของน้ำมันที่ตำแหน่ง 12, 13, 14, 15, 16 และ 17



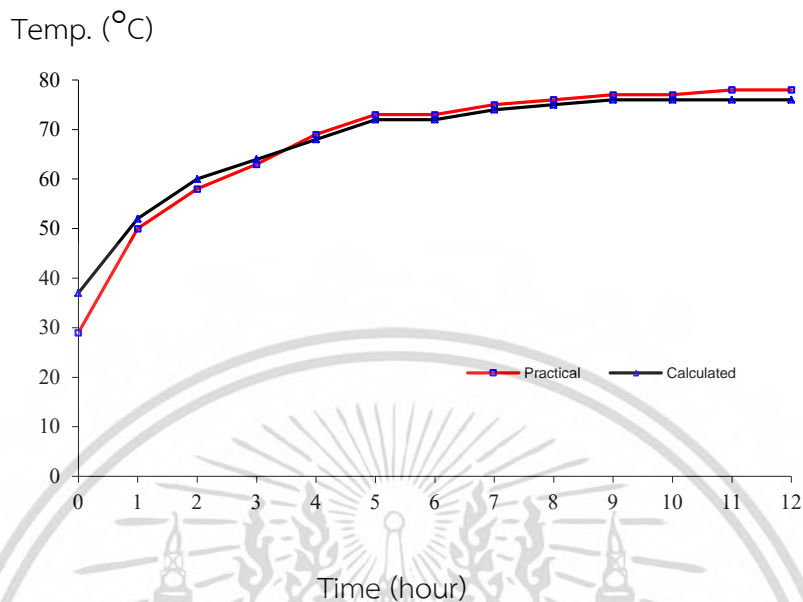
รูปที่ 4.13 ผลการวัดความต้านทานขดลวดแรงดันสูง ณ จุดตัดไฟ



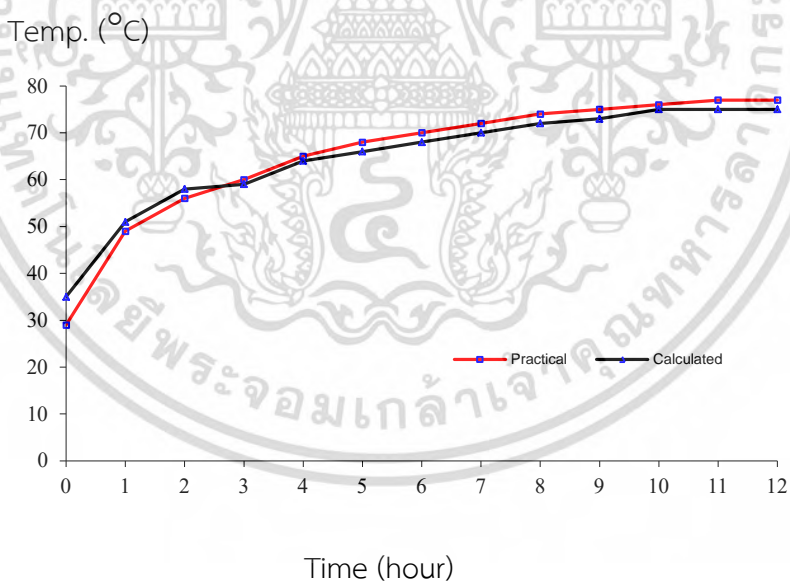
รูปที่ 4.14 ผลการวัดความต้านทานขดลวดแรงดันต่ำ ณ จุดตัดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดสอบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดหม้อแปลงด้านแรงดันต่ำ และแรงดันสูงระหว่างผลการทดสอบกับผลการคำนวณที่พิกัดโหลด แสดงได้ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดแรงดันต่ำ (T_h) ระหว่างผลการทดสอบกับผลการคำนวณที่พิกัดโหลด



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดแรงดันสูง (T_h) ระหว่างผลการทดสอบกับผลการคำนวณที่พิกัดโหลด

หมายเหตุ:

- รูปที่ 4.16 และ 4.17 อุณหภูมิแวดล้อมมีค่า = 30 °C เมื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ (T_h).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลการออกแบบหม้อแปลงระหว่างแบบเดิม(original regulation) กับที่ทำการออกแบบใหม่(new regulation) หม้อแปลงขนาด 400 kVA

Parameter	400 kVA	
	original regulation	new regulation
1. No Load Loss(w) - Guarantee	720	720
-Test	700.5	610.0
2. Load Loss(w) - Guarantee	4150	4150
-Test	4040.3	3949.3
3. Total loss(w)	4740.3	4559.3
4. Hottest-spot of top oil ($^{\circ}$ C)	81.0	73.0
5. Hottest-spot of HV.wdg. ($^{\circ}$ C)	88.3	76.7
6. Hottest-spot of LV.wdg. ($^{\circ}$ C)	89.8	78.8
7. Top oil Temp rise ($^{\circ}$ C) - Guarantee	60	60
-Test	51.0	42.0
8. Winding Temp rise . ($^{\circ}$ C)		
- Guarantee	65	65
- HV. Winding	60.3	45.7
- LV. Winding	61.8	47.8

ตารางที่ 4.14 พารามิเตอร์จากการออกแบบที่นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ขณะทดสอบ short circuit withstand หม้อแปลงขนาด 400 kVA

Parameter	original regulation		new regulation	
	HV side	LV side	HV side	LV side
Reactance (%)	3.77	-	4.18	-
Resistance (%)	1.11	-	1.10	-
Per unit impedance	0.0393	-	0.0432	-
Resistance per phase at 75 deg. C (ohm/phase)	11.82	0.00146	11.05	0.00125
Winding height (mm) : Hw	425	465	365	385
Number of turn per limb : N	2700	27	2600	26
Current density of winding (A/mm^2) : J	2.38	2.61	2.52	2.48
Mean diameter of winding (mm) : Dm	285	207	162	212
Radial of winding 1 : a1	-	22	-	23
Radial of winding 2 : a2	31	-	30	-
Width of main duct (mm) : d	12		11.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณพารามิเตอร์ขณะลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 400 kVA แสดงดังตารางที่ 4.15 และตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.15 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 400 kVA ด้านแรงดันสูง

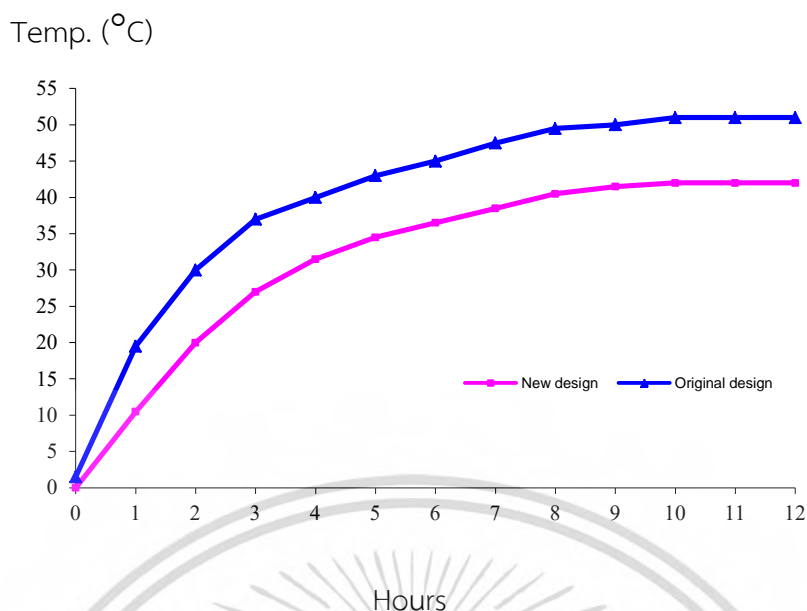
Parameter	original regulation	new regulation	% difference
Asymmetrical short circuit current (A)	304.57	285.20	6.79
σ_{mean}	34.53	34.40	0.38
Radial force	1491.49	1351.47	10.36
Axial force	99.45	98.80	0.66
Final winding temperature($^{\circ}\text{C}$)	155.55	151.65	2.57

ตารางที่ 4.16 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายขณะทดสอบการลัดวงจรของหม้อแปลงขนาด 400 kVA ด้านแรงดันต่ำ

Parameter	original regulation	new regulation	% difference
Asymmetrical short circuit current (A)	29015.09	27169.38	6.79
σ_{mean}	23.77	22.32	6.50
Radial force	892.06	848.97	5.08
Axial force	62.69	59.26	5.79
Final winding temperature($^{\circ}\text{C}$)	166.73	150.09	11.09

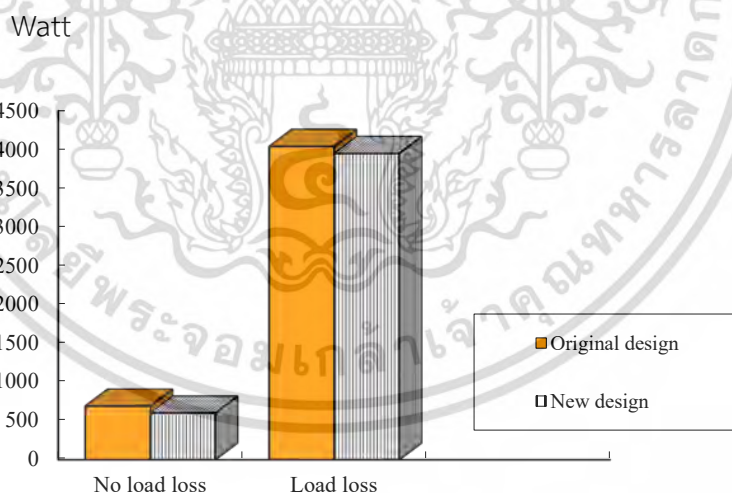
จากตารางที่ 4.15 และ 4.16 จะเห็นว่าผลจากการออกแบบใหม่จะทำให้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการลัดวงจรลดลงจากการออกแบบในลักษณะเดิม ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขเทคนิคใหม่ของการออกแบบหม้อแปลงที่นำเสนอคือ การออกแบบและปรับพารามิเตอร์ต่างๆ จะต้องออกแบบให้หม้อแปลงมีความสูญเสีย เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ เป็นไปตามข้อกำหนดของ PEA ค่าของแรงขณะลัดวงจรและอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะลัดวงจรจะต้องมีค่าต่ำกว่าการออกแบบในแบบเดิม ค่าเปอร์เซนต์ความแตกต่างในตารางจะเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจว่า ผลของการออกแบบใหม่ ทำให้หม้อแปลงมีสมรรถนะและประสิทธิภาพดีขึ้นและเป็นไปตามข้อกำหนด และมาตรฐานที่กำหนด

การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบรหหว่างแบบเดิม(original regulation) กับแบบที่การออกแบบใหม่(new regulation) ที่พิกัดโหลดหม้อแปลงขนาด 400 kVA แสดงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้าบนระหว่างแบบเดิม(original regulation) กับแบบที่ทำการออกแบบใหม่(new regulation) ที่พิกัดโหลดหม้อแปลงขนาด 400 kVA

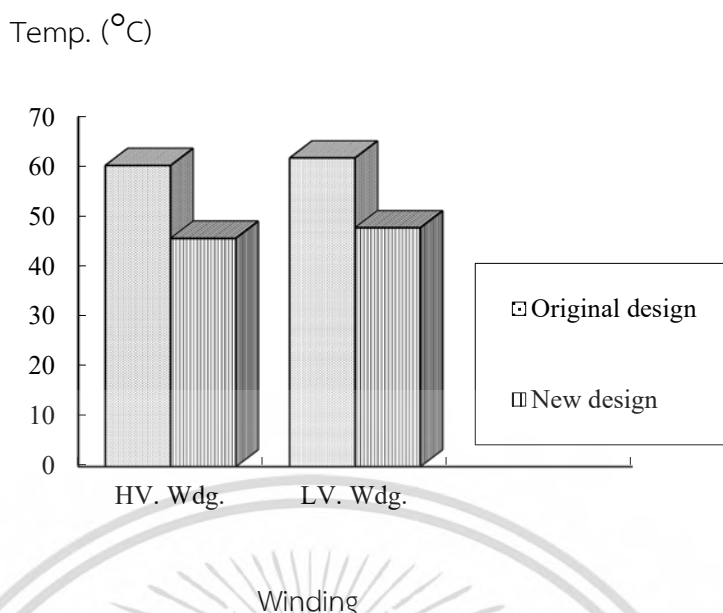
การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างแบบเดิม(original regulation) กับแบบที่ทำการออกแบบใหม่(new regulation) แสดงได้ดังรูปที่ 4.19 และการเปรียบเทียบผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดระหว่างแบบเดิม(original regulation) กับแบบที่ทำการออกแบบใหม่(new regulation) แสดงได้ดังรูปที่ 4.20



Loss

รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างแบบเดิม(original regulation) กับแบบที่ทำการออกแบบใหม่ (new regulation) ที่พิกัดโหลดหม้อแปลงขนาด 400 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดระหว่างแบบเดิม(original regulation) กับแบบที่ทำการออกแบบใหม่(new regulation) ที่พิกัดโหลดหม้อแปลงขนาด 400 kVA

4.8 การวิเคราะห์ผลจากการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการออกแบบหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายเพื่อให้สามารถทนต่อกระแสลัดวงจรได้ตามข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แต่อีกส่วนหนึ่งที่สำคัญคือค่าความสูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลงก็เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา จากกราฟที่ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความสูญเสียระหว่างการออกแบบเดิมกับการออกแบบใหม่ จะเห็นว่าผลจากการออกแบบใหม่จะมีค่าความสูญเสียและอุณหภูมิลดลงจากการออกแบบเดิม ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิของขดลวดลดลง ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น

จากการออกแบบใหม่ และได้คำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการทนการลัดวงจร จะเห็นว่า ถ้าออกแบบให้พารามิเตอร์มีค่าที่เหมาะสมก็จะทำให้ช่วยลดกระแสลัดวงจร ลดแรงขณะลัดวงจร และยังช่วยลดอุณหภูมิสุดท้ายขณะลัดวงจรลงได้ จากผลการคำนวณดังกล่าวมาแล้วจะเห็นว่า อุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดหลังจากเกิดการลัดวงจรมีค่าสูงกว่า 105 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสูงกว่าระดับชั้นอุณหภูมิของฉนวนที่ใช้ (Temperature class A, 105 องศาเซลเซียส) ดังนั้นขณะหม้อแปลงเกิดการลัดวงจรขึ้น จะส่งผลให้ฉนวนของขดลวดและส่วนประกอบอื่นๆ เสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็ว ถ้าหากผู้ออกแบบสามารถทำการออกแบบหม้อแปลงโดยลดอุณหภูมิตรงส่วนนี้ลงได้ก็จะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพน้อยลง และทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานนานมากยิ่งขึ้น

สำหรับการทดสอบ BIL และ short circuit withstand หม้อแปลงผ่านการทดสอบอย่างสมบูรณ์ ฉนวนสามารถรับแรงดัน BIL ได้โดยไม่ชำรุดเสียหาย สำหรับขดลวดและโครงสร้างต่างๆ สามารถทนต่อสภาวะลัดวงจรได้โดยไม่ชำรุดเสียหายเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการออกแบบใหม่ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ วิธีการหาค่ากระแส ลัดวงจร เวลาในการลัดวงจร และอุณหภูมิสุดท้ายขณะลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ จำหน่าย ซึ่งจะเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถเลือกพารามิเตอร์ของการออกแบบได้อย่าง เหมาะสมที่สุด เช่น การเลือกขนาดของขดลวด การเลือกพื้นที่หน้าตัดของฉนวน ชนิดและขนาดของ วัสดุที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลง เป็นต้น ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้จะสามารถ ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถทำการออกแบบและคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ ซึ่ง พารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิของหม้อแปลงขณะใช้งานและส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิ สุดท้ายของหม้อแปลงขณะลัดวงจร ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการทนกระแสลัดวงจร และมีอายุ การใช้งานเพิ่มมากขึ้น

จากการทดสอบและวิเคราะห์ผลจะทำให้เห็นว่าเทคนิคจากการออกแบบใหม่จะทำให้อุณหภูมิ ของหม้อแปลงขณะใช้งานและขณะเกิดการลัดวงจร มีค่าต่ำลง และจะเห็นว่าผลจากการออกแบบกับ ผลจากการทดสอบมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งก็ทำให้ยืนยันได้ว่าข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้ อ้างอิงและใช้เป็นแนวทางในการออกแบบหม้อแปลงที่ใช้ในระบบจำหน่ายได้ และยังช่วยให้หม้อ แปลงที่ได้จากการออกแบบใหม่นี้มีค่าความสูญเสียต่ำลง ซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานสูญเสีย และ ช่วยให้มีหม้อแปลงมีอายุการใช้งานยาวนานมากยิ่งขึ้น และยังทำให้สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการ ซ่อมบำรุงและลดอันตรายจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าลงได้

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะเป็นข้อมูลที่ยืนยันได้ว่าสามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้อ้างอิงใน การปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติของการทำงานให้ดียิ่งขึ้นสามารถ รับโหลดและทนการลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ และวิเคราะห์พารามิเตอร์ของหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเป็นไปตามข้อกำหนดของ มาตรฐาน IEC และข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(PEA)

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายจำนวน 3 ขนาด ซึ่งสามารถ นำแนวทางจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการออกแบบหม้อแปลงขนาดอื่นๆ ได้

สำหรับแนวทางในการพัฒนาต่อไปคือ สามารถนำผลที่ได้จากการออกแบบและทดสอบจาก งานวิจัยนี้ มาทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการ ทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดจุ่มในน้ำมันขณะจ่ายโหลดและขณะลัดวงจร และสามารถทำ การทำนายเพื่อวิเคราะห์อายุฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าได้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] บุญเลิศ สือเฉย. การออกแบบและการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่าย. มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์. 2550.
- [2] C. Chompoo-inwai, W.J. Lee, P. Fuangfoo, M. Williams, and J. Liao. "System Impact Study for the Interconnection of Wind Generation and Utility System." **IEEE Trans. of Industrial Application**, Vol.41, issue 1, 2005. pp.163-168,
- [3] T.C.B.N. Assuncao, J.L.Silvino and P.Resende. "Transformer Top-Oil Temperature Modeling and Simulation." **World Academic of Science, Engineering and Technology**, Vol.2, 2008. pp.958-963.
- [4] R.P.P.Smeets, L.H.TE. Paske, P.P. Leufkens and T.F.Ogelberg. "Thirteen Years Test Experience with Short-Circuit withstand Capability of Large Power Transformer." **Cigre 2009, Proc. 6th Southern Africa Regional Conference**, 2009. pp.1-7.
- [5] P. Geno Peter. "Calculations for Short Circuit Withstand Capability of a Distribution Transformer." **International Journal of Advancements in Technology**, Vol.2, No.1, 2011. pp.142-150.
- [6] Y. Bicen, Y. Cilliyuz, F. Aras, and G. Aydugan. "An Assessment on Aging Model of IEEE/IEC Standards for Natural and Mineral Oil-Immersed Transformer." **Proc. IEEE International Conference on Dielectric Liquids**, 2011.
- [7] A. Mamizadeh, and I. Iskender. "Analyzing and Comparing the Hot-spot Thermal Models of HV/LV Prefabricated and Outdoor Oil-Immersed Power Transformers." **World Academic of Science, Engineering and Technology**, Vol.6, 2012. pp.34-39.
- [8] B. Suechoey, N. Chotiwanaporn, P. Jayasak, and C. Chompoo-inwai. "Proposition of Individual Guide for Distribution Transformer Design to Withstand Short Circuit Condition." **Proc. The 20th ICEE International Conference on Electrical Engineering, Jeju, Korea**, July, 2014.
- [9] B. Suechoey, W. Tangsrianukul, M. Leelajinda, and C. Chompoo-inwai. "Novel Techniques for Improving Short Circuit Withstand Capability of Distribution Transformer Considering Short Circuit Force and Winding Temperature." **Proc. The 21th ICEE International Conference on Electrical Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong**, July, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Provincial Electricity Authority Thailand (PEA). “Three-Phase Transformer for 22 kV and 33 kV Distribution Systems with Ability to Withstand Short Circuit.” Specification No. RTRN-035/2558, 2015.
- [11] IEC 60076-2. “Power Transformer Part 2 : Temperature Rise.” 2006.
- [12] ANSI/IEEE C57.91. “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.” 1995.
- [13] IEC 60076-5. “Power Transformer Part 5: Ability to Withstand Short Circuit.” 2006.
- [14] IEC 354. “Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer.” 2006.
- [15] ANSI/IEEE C57.12.00. “American National Standard IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.” 2010.
- [16] Bharat Heavy Electrical Ltd. **Transformer**. 2nd Edition. New Delhi. Tata McGrew-Hill Publishing Co. Ltd. 2003.
- [17] S.Tadsuan, B.Suechoey, V.Kinnares, S.Bunjongjit, and N.Kritsanajinda. “Testing of Temperature at Conductor and Oil of Mineral Oil-Immersed Transformer in order to be Criterion for Transformer Design.” **KMUTT Research and Development Journal**, Vol.23, No.2, 2000. pp.59-77.
- [18] B.Suechoey, S.Tadsuan, C.Thammarat, and M.Leelajindakraierk. “An Analysis of Temperature and Pressure on Loading Oil-Immersed Distribution Transformer.” **Proc. The 7th International Power Engineering Conference**, Marina Mandarin Hotel, Singapore, 2005.
- [19] Ahmet Y. Arabul, Ibrahim Senol, Fatma Keskin Arabul, Mustafa G. Aydeniz, Yasemin Oner and Gokhan kalkan. “An Investigation on Hot-Spot Temperature Calculation Methods of Power Transformers.” **International Journal of Energy and Power Engineering**, Vol.9, pp.1036-1040, 2015.
- [20] T. Qian, W.H. Tang, W.J. Jin, L.Gan, Y.Q. Liu and G.J. Lu. “Comparisons of Transformer Top Oil Temperature Calculation Models Using Support Vector Regression Optimized by Genetic Algorithm.” **Proc. 24th International Conference on Electricity Distribution**, Glasgow, 2017.
- [21] Zoran Radakovic, Uros Radoman and Predrag Kostic. “Decomposition of the Hot-Spot Factor.” **IEEE Trans. on Power Delivery**, Vol.30, No.1, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] Kerry D. McBee and Macelo G. Simoes. “General Smart Meter Guidelines to Accurately Assess the Aging of Distribution Transformer.” **IEEE Trans. on Smart Grid**, Vol.5, No.6, 2014. pp.2967-2979.
- [23] Rizwan UI Hassan, Umar Tabrez Shami and Adnan Safdar. “Evaluation of Losses and Life of Distribution Transformer under Non-linear Load using Wavelet Transform.” **Proc. of the Pakistan Academy of Sciences**, 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

รายละเอียดผลการทดสอบหม้อแปลง 160 kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



516/2 Moo 2 Bangpoo Industrial Estate Samutprakarn 10280
 Tel. 02-706-7699, 02-709-4490-9 Fax. 02-323-0910, 02-709-3236
 e-mail address : test@tirathai.co.th
<http://www.tirathai-transformer.co.th>

Sheet 1 / 20

TRANSFORMER TEST REPORT

Customer PHONGPIMARN ELECTRIC CO., LTD.
 Address 42/1 Moo. 3 Omnaoi, Kratumban, Samutsakorn

Transformer 160 kVA 3 Phase 50 Hz 22000 - 400 V
 Tapping range +/- 2 X 2.50 %
 Cooling type ONAN
 Vector group Dyn11
 Serial No. 600068
 Report No. 60-T013-01
 Manufacturer PHONGPIMARN ELECTRIC CO., LTD.
 Applied standard Reference Content Page

Control No. 60-T013-01
 Receipt date 18 / 05 / 2017
 Test date 18 - 22 / 05 / 2017
 Issue date 23 / 02 / 2017

Prepared by W. MANEEWAN
 (Mr. Wongsakorn Maneewan)
 Electrical Engineer

Checked by Kittipong
 (Mr. Kittipong Phibun)
 Electrical Senior Engineer

Approved by Chalerm
 (Mr. Chalermusak Wuttisela)
 Electrical Test Bay Manager

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.

This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Rev. 2, August 11, 2016

TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Items	Standard	Test Uncertainty	Sheet
1. External Clearances in Air Measurement	IEC 60076-3 (2013) clause 16.2	-	3
2. Transformer Test Results	-	-	4
3. Measurement of voltage ratio and check of phase displacement	IEC 60076-1 (2011) clause 11.3	-	5
4. Measurement of winding resistance	IEC 60076-1 (2011) clause 11.2	-	6
5. Insulation resistance test	IEEE C57.12.90 (2010) clause 10.11	-	7
6. Applied voltage test (AV)	IEC 60076-3 (2013) clause 11.5	-	8
7. Induced voltage withstand test (IVW)	IEC 60076-3 (2013) clause 11.2	-	8
8. Measurement of no-load loss and current	IEC 60076-1 (2011) clause 11.5	-	9
9. Measurement of short-circuit impedance and load loss	IEC 60076-1 (2011) clause 11.4	-	10
10. Efficiency and Voltage Regulation Calculation	IEC 60076-8 (1997)	-	10
11. Temperature Rise Test	IEC 60076-2 (2011) clause 7.0	-	11
12. Lightning impulse tests (LI)	IEC 60076-3 (2013) clause 13.2	-	16
13. Outline Drawing	-	-	19
14. Inside Construction	-	-	20

Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested. Prepared by **W. MANEYUAN**
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory. Electrical Engineer
 Rev. 2, August 11, 2016 TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PHONGPIMARN ELECTRIC CO., LTD.			
OIL IMMERSED OUTDOOR TRANSFORMER			
kVA	160	Fac.SN.	600068
HV	22000 V	LV	400 / 230 V
HV BIL	125 kv	LV BIL	2.90 kv
HV CURRENT	4.20 A	LV CURRENT	230.9 A
TYPE OF COOLING	ONAN	STANDARD	TIS 384
PHASE	3	FREQUENCY	50 Hz
CLASS	A	IMP. VOLT. AT	75 %
OIL TEMP. RISE	60 K	OIL	190 l
WIND. TEMP. RISE	65 K	UNTANK MASS	444 kg
MAX. AMB. TEMP.	45 °C	TOTAL MASS	740 kg
		YEAR	2017
Connection Diagram		Vector Diagram	
Connection Dyn11			
HV SIDE		INSULATING LIQUID	
TAP	CONNECTION	TAP VOLTAGE	MINERAL OIL
1	5-4	21000	COPPER
2	5-3	22000	
3	6-3	23000	
4	6-2	24500	
5	7-2	26000	
		CONTRACT No.	
		PEA CODE	
		No. ASE-104	

Phase - Ground (mm.)

A - G	B - G	C - G	a - G	b - G	c - G	n - G
320	320	320	50	50	50	50

Phase - Phase (mm.)

A - B	B - C	a - b	b - c	c - n
250	250	90	100	90

Phase HV - Phase LV (mm.)

A - a	A - b	A - c	A - n	B - a	B - b	B - c	B - n	C - a	C - b	C - c	C - n
250	325	450	585	330	265	265	335	570	435	320	250

Minimum Clearances in Air for standard IEC 60076 clause 16.2

Um for equipment : 36 kV 24 kV 12 kV <1.1 kV
 Minimum Air Clearance : 320 mm. 220 mm. 120 mm. -

Oil : 190 litre
 Total Weight : 740 kg

Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.
 Rev. 2, August 11, 2016

W. MANEYVAN
 Electrical Engineer
 TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description		Test result	Guarantee	Tolerance
	Base on (kVA)	160	-	-
1. Exciting current	(A)	3.337	-	-
	(%)	1.445	-	-
2. No - load loss	(kW)	0.336	-	-
3. Load loss 75 °C , rated tap	(kW)	2.053	-	-
4. Total loss	(kW)	2.389	-	-
5. Imp. Voltage 75 °C , rated tap	(%)	3.98	-	-
6. Temperature rise test				
	Cooling type	<u>ONAN</u>	<u>ONAN</u>	
	HV winding temperature rise (K)	61.7	65.0	-
	LV winding temperature rise (K)	63.9	65.0	-
	Oil temperature rise (K)	52.5	60.0	-



Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.
Rev. 2, August 11 , 2016

ว. MANEFAWAN
Electrical Engineer
TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Measurement of voltage ratio and check of phase displacement

TAP	System voltage		Ratio	Transformer ratio error in [%]			Note
	HV winding	LV winding		A - B a - n	B - C b - n	C - A c - n	
1	23100	400	100.0	-0.02	-0.02	-0.03	
2	22550	400	97.64	-0.01	-0.01	-0.01	
3	22000	400	95.26	-0.02	-0.02	-0.02	
4	21450	400	92.88	-0.01	-0.02	-0.01	
5	20900	400	90.50	-0.01	-0.01	-0.01	

Vector group : Dyn11

Criteria : Deviation not more than $\pm 0.5\%$



Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.
Rev. 2, August 11, 2016

ว. MANEEWAN
Electrical Engineer
TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Measurement of winding resistance

Temperature

Top oil temp. (T1)	30.5	°C
Upper radiator (T2)	30.3	°C
Lower radiator (T3)	29.8	°C
Average winding temp. = (T1 + T3) / 2 =	30.2	°C

Conductor Material

HV winding material	Copper
LV winding material	Copper

TAP	HV winding (Ω)			Note
	A - B	B - C	C - A	
1	32.618	32.618	32.639	
2	31.745	31.745	31.752	
3	30.868	30.868	30.875	
4	30.008	30.010	30.016	
5	29.150	29.155	29.159	

TAP	LV winding (mΩ)			Note
	a - b	b - c	c - a	
-	10.642	10.676	10.728	

Criteria : Deviation not more than + 5%

Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.

This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

W. MANEEWAN
Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Insulation resistance Transformer test.

Temperature at 20.0 °C : Insulation resistance \geq 500 M Ω

Test voltage (V)	Winding	Measured at 30.2 °C		Corrected at 20 °C		P.I.
		M Ω (1 min)	M Ω (10 min)	M Ω (1 min)	M Ω (10 min)	
2500	HV - (LV+G)	17080	-	34331	-	-
2500	LV - (HV+G)	8790	-	17668	-	-
2500	(HV+LV) - G	8480	-	17045	-	-



Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

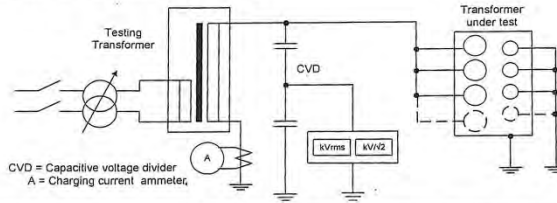
The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.
Rev. 2, August 11, 2016

W. MANEEWAN
Electrical Engineer
TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Applied voltage test (AV)

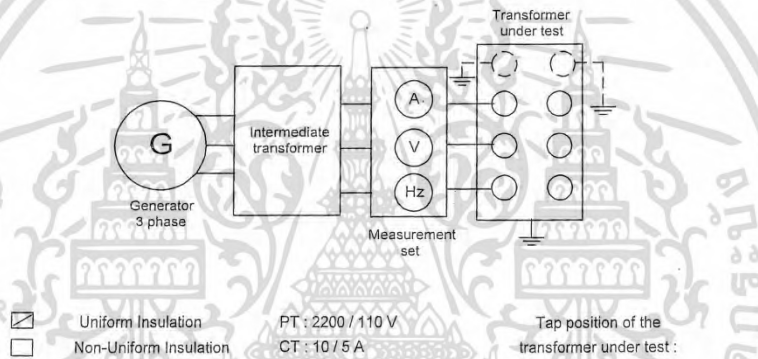
Simplified connection diagram of the test arrangement



Winding	Earth	Frequency (Hz)	Voltage (kV)	Current (mA)	Time (sec.)	Test result
HV	LV, Tank	50	50	-	60	Withstood
LV	HV, Tank	50	3	-	60	Withstood

7. Induced voltage withstand test (IVW)

Simplified connection diagram of the test arrangement



Supply (V)	Test Voltage (kV)	Frequency (Hz)	Time(sec)	Test Result
LV winding	HV winding			
800	44	200	30	Withstood

Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.
Rev. 2, August 11, 2016

W. MANEEWAN
Electrical Engineer
TF-T1-501
TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Measurement of no-load loss and current

Condition : Supplied voltage to LV winding and HV winding open circuit

Base on : 160 kVA

Multiplier : Voltage PT = 440 / 110 V

Current CT = 10 / 5 A

%	Test voltage			Current measurement Multiplier = 1				No - load loss measurement Multiplier = 1			Correction Loss (kW)	
	Voltage (V)	Volt. rms.	Volt. mean.	I1	I2	I3	Excit. (A)	W1	W2	W3		Loss (kW)
100	400	405.81	399.99	3.4020	2.9990	3.6096	3.337	27.76	141.68	171.44	0.341	0.336



Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.

This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

W. MANEERWAN
Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. Measurement of short-circuit impedance and load loss

Condition : Supplied current to HV winding and LV winding short circuit
 Base on : 160 kVA Reference temp : 75.0 °C
 Multiplier : Voltage PT = 2200 / 110 V Temp. factor : 1.169
 Current CT = 10 / 5 A

Multiplier	Measurement					Calculation			
	1	1	1	@ 30.2 °C		$\Sigma I^2 R$ loss (kW)	Load loss (kW)	Correction loss (kW)	Load Impedance (%)
Tap No	Voltage (V)	Current (A)	Loss (kW)	R_{HV} (Ω)	R_{LV} (m Ω)				
3	869	4.214	1.800	30.870	10.682	1.671	1.788	2.053	3.98

10. Efficiency

Tap No	No load Loss (kW)	Load loss (kW)				Efficiency at PF = 1 (%)			
		pu = 1.0	pu = .75	pu = .50	pu = .25	pu = 1.0	pu = .75	pu = .50	pu = .25
3	0.336	2.053	1.155	0.513	0.128	98.53	98.77	98.95	98.85

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Rated Power}}{\text{Rated Power} + \text{No-load loss} + \text{pu}^2 \times \text{Load loss}} \times 100 \text{ (\%)}$$

10. Voltage Regulation

Tap No	pu	%Z	%R	%X	Voltage regulation (%)	
					PF = 1	PF = 0.8
3	1.00	3.98	1.283	3.77	1.354	3.315

$$\text{Voltage Regulation} = n \times p + \frac{(nq)^2}{200} \text{ (\%)}$$

Where n = pu (per-unit load)

$$p = \%R \cos \delta + \%X \sin \delta$$

$$q = \%R \sin \delta - \%X \cos \delta$$

cos δ = Power factor

$$\sin \delta = \sqrt{1 - \cos^2 \delta}$$

Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

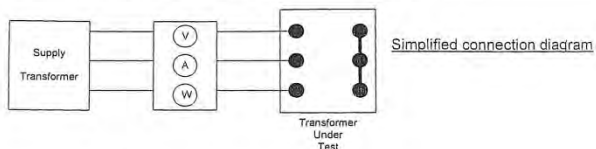
The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.
 Rev. 2, August 11, 2016

W MANEEWAN
 Electrical Engineer
 TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Temperature rise test

Test condition : System Voltage 22 kV and supplied current to HV side at Tap 3



Characteristic of transformer		Description
Base on capacity	(kVA)	160
HV current	(Amp)	4,199
No-load loss	(kW)	0.341
Load loss Tap 3	(kW)	2,053
Total loss	(kW)	2,394
- Oil temp. rise		<u>Test result</u>
Test loss	(kW)	2,389
Top oil temp. rise ($\Delta\theta_u$)	(K)	52.4
Aver. oil temp. rise ($\Delta\theta_o$)	(K)	39.4
(Total loss / Test loss) ^X	(Cw)	1,002
	X =	0.8
<u>Corrected value</u>		
$\Delta\theta_u \times C_w$	(K)	52.5
$\Delta\theta_o \times C_w$	(1) -- (K)	39.4
- Winding temp. above Avg. oil temp. rise		<u>Test result</u>
Winding under test		HV LV
Test current	(Amp)	4,199 230.9
$\Delta\theta_w$	(K)	22.3 24.5
(Rated current / Test current) ^Y	(Ci)	1,000 1,000
	Y =	1.6
<u>Corrected value</u>		
HV $\Delta\theta_w \times Ci$	(2) -- (K)	22.3
LV $\Delta\theta_w \times Ci$	(3) -- (K)	24.5
- Conclusion		<u>Test result</u>
HV winding temp. rise	(1)+(2) (K)	61.7
LV winding temp. rise	(1)+(3) (K)	63.9
Top oil temp. rise	(K)	52.5

Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

W MANEEWAN
Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

TF-T1-501

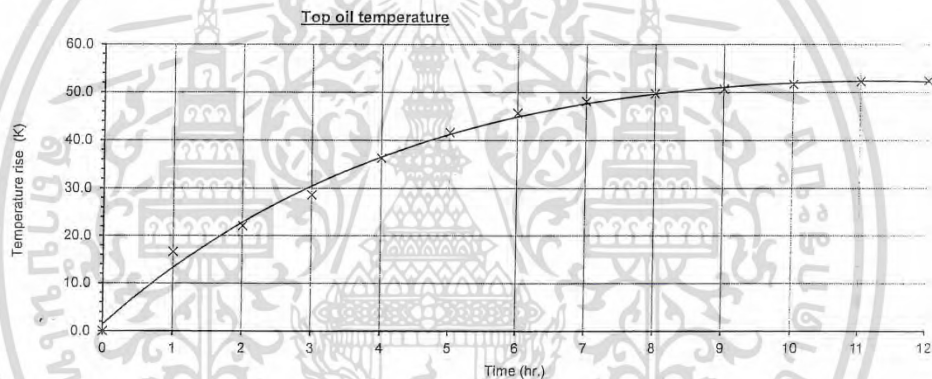
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Condition : Load loss test

Cooling type : ONAN

Use fan unit : -

Time (hour)	Voltage (V)	Current (Amp)	Test loss (kW)	Top oil			Ambient Temperature					Top oil temp. rise	Average oil temp. rise
				T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	Average		
0	999.9	4.851	2.389	30.6	30.2	29.8	30.5	30.5	30.8	30.5	30.6	0.0	-0.4
1	956.4	4.588	2.389	47.6	45.9	34.5	30.9	30.9	31.3	31.0	31.0	16.6	10.1
2	955.8	4.545	2.389	53.2	51.7	37.8	30.9	30.8	31.4	31.1	31.1	22.1	14.4
3	945.0	4.522	2.389	59.8	58.3	41.5	31.1	30.9	31.6	31.2	31.2	28.6	19.5
4	936.9	4.467	2.389	68.2	66.6	46.6	31.8	31.6	32.3	31.9	31.9	36.3	25.5
5	932.9	4.439	2.389	74.0	72.5	50.4	32.3	32.1	32.7	32.6	32.4	41.6	29.8
6	929.1	4.419	2.389	77.8	76.1	53.1	32.0	31.8	32.5	32.4	32.2	45.6	33.3
7	927.3	4.408	2.389	79.9	78.1	54.7	31.6	31.4	32.0	32.0	31.8	48.1	35.5
8	927.7	4.395	2.389	81.1	79.5	55.8	31.2	31.0	31.6	31.6	31.6	49.7	37.1
9	927.3	4.405	2.389	81.8	80.0	56.5	31.0	30.7	31.4	31.4	31.1	50.7	38.1
10	922.1	4.376	2.389	82.6	80.8	56.8	30.7	30.6	31.1	31.2	30.9	51.7	38.8
11	925.3	4.397	2.389	82.7	81.0	56.8	30.2	30.1	30.7	30.7	30.4	52.3	39.4
12	927.2	4.399	2.389	82.8	81.0	56.7	30.1	30.1	30.7	30.7	30.4	52.4	39.4
Reduce to rated current													
12	883.7	4.199	2.179	82.8	81.0	56.7	30.1	30.1	30.7	30.7	30.4	52.4	39.4
13	882.1	4.199	2.161	81.6	79.8	56.0	30.1	30.0	30.7	30.7	30.4	51.2	38.4
Shutdown measure R _{LV} & R _{UV}													



Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.

This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

W. MANEEWAN
Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



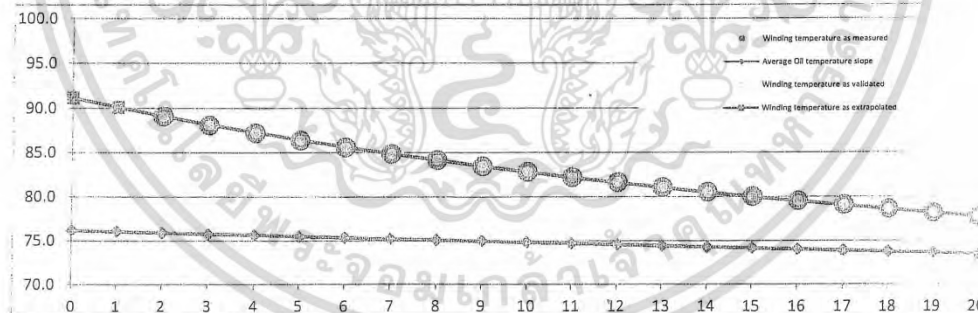
The Extrapolation of winding temperature to the instant of shutdown @ HV winding Base on : 160 kVA

-Example of cooling down curve calculation spreadsheet

Legend : Data to be inserted
 Time interval $\Delta t = 1$ min
 Initial average-liquid temp. $q_{om_start} = 68.8$ °C
 Final average liquid temp. $q_{om_end} = 66.1$ °C
 Liquid temperature slope. $k = 0.135$ K/min
 Estimated winding time constant $T_w = 15.9$ min
 Estimated average liquid temp. $A_0 = 76.2$ °C
 Estimated winding-to-liquid gradient $B = 15.0$ K
 Average winding temp.at the instant of shut-down. $q_{wo} = 91.1$ °C

Auxiliary variables:											
$t_c = -4.939408$		$t_e = 0.0648543$		Abs Sums:		$n = 18$	$S_b = 1508.8$	$S_a = 8.944$	$S_c = 756.6$	$S_d = 126580.6$	$S_e = 9.21028$
Time (min)	$\theta_{om(i)}$ As	$\theta_{wm(i)}$ as measured	$\theta_{wval(i)}$	$\theta_{wcor(i)}$	ν (0/1)	$\theta_{w(i)}$ as corrected and Validated	$\Delta\theta_{w(i)}$ as Per eq. (C.5)	$\theta_{w(i)} \times \Delta\theta_{w(i)}$	$(\theta_{w(i)})^2$	e^{-i/T_w}	$\theta_{w(i)}$ as calculated
0	76.2	0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0	91.1
1	76.0	0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0	90.1
2	75.9	89.1	89.1	89.3	1	0.0	0	0.0	0	0	89.1
3	75.8	88.1	88.1	88.5	1	88.5	-0.9	-75.4	7830.8	0.82819	88.2
4	75.6	87.2	87.2	87.7	1	87.7	-0.8	-67.2	7695.8	0.77775	87.3
5	75.5	86.4	86.4	87.0	1	87.0	-0.7	-60.0	7575.3	0.73038	86.4
6	75.4	85.6	85.6	86.4	1	86.4	-0.7	-56.6	7461.8	0.68590	85.6
7	75.2	84.8	84.8	85.8	1	85.8	-0.6	-52.5	7356.5	0.64412	84.9
8	75.1	84.1	84.1	85.2	1	85.2	-0.6	-48.5	7259.2	0.60489	84.1
9	74.9	83.5	83.5	84.7	1	84.7	-0.5	-45.3	7168.4	0.56805	83.5
10	74.8	82.8	82.8	84.2	1	84.2	-0.5	-42.8	7082.5	0.53346	82.8
11	74.7	82.2	82.2	83.7	1	83.7	-0.5	-39.7	7002.9	0.50097	82.2
12	74.5	81.6	81.6	83.3	1	83.3	-0.4	-35.9	6930.8	0.47045	81.6
13	74.4	81.1	81.1	82.8	1	82.8	-0.4	-35.0	6860.6	0.44180	81.0
14	74.3	80.5	80.5	82.4	1	82.4	-0.4	-33.4	6793.5	0.41489	80.5
15	74.1	80.0	80.0	82.0	1	82.0	-0.4	-31.2	6731.0	0.38963	80.0
16	74.0	79.5	79.5	81.7	1	81.7	-0.4	-29.6	6671.6	0.36590	79.5
17	73.9	79.1	79.1	81.4	1	81.4	-0.3	-26.7	6618.0	0.34361	79.0
18	73.7	78.6	78.6	81.0	1	81.0	-0.3	-26.6	6564.7	0.32268	78.6
19	73.6	78.1	78.1	80.7	1	80.7	-0.3	-25.8	6513.0	0.30303	78.1
20	73.5	77.7	77.7	80.4	1	80.4	-0.3	-24.3	6464.2	0.28457	77.7

Extrapolation of the cooling down curve, using the fitting curve $q_w(t) = A_0 - kt + Be^{-(t/T_w)}$



Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

W. MANEEWAN
 Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

TF-T1-401

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The Extrapolation of winding temperature to the instant of shutdown @ LV winding Base on : 160 kVA

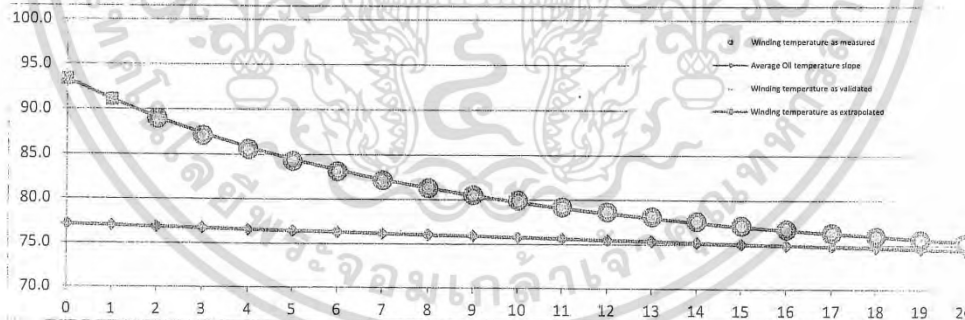
-Example of cooling down curve calculation spreadsheet

Legend : Data to be inserted
 Time interval Δt= 1 min
 Initial average-liquid temp. θ_{om_start} = 68.8 °C Estimated winding time constant Tw= 7.1 min
 Final average liquid temp. θ_{om_end} = 66.1 °C Estimated average liquid temp. A₀= 77.1 °C
 Liquid temperature slope. k= 0.135 K/min Estimated winding-to-liquid gradient B= 16.2 K
 Average winding temp.at the instant of shut-down. θ_{wo} = 93.3 °C

Auxiliary variables:
 $t_0 = -11.67878$
 $t_e = 0.1514819$
 Abs Sums: n 18 Sb 1462.3 Sa 11.287 Sc 938.1 Sd 118928.1 Se 4.58571

Time (min)	$\theta_{om(i)}$ A ₀ -kt	$\theta_{wm(i)}$ as measured	$\theta_{wval(i)}$	$\theta_{wcor(i)}$	$\frac{\theta_{w(i)}}{(0/1)}$	$\theta_{w(i)}$ as corrected and Validated	$\Delta\theta_{w(i)}$ as Per eq. (C.5)	$\theta_{w(i)} \times \Delta\theta_{w(i)}$	$(\theta_{w(i)})^2$	e^{-i/T_w}	$\theta_{w(i)}$ as calculated
0	77.1	0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0	93.3
1	77.0	0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0	91.1
2	76.8	89.0	89.0	89.2	1	87.5	-1.7	-149.4	7658.5	0.65498	87.3
3	76.7	87.1	87.1	87.5	1	86.1	-1.4	-121.3	7414.0	0.56882	85.8
4	76.6	85.6	85.6	86.1	1	84.9	-1.2	-100.6	7211.4	0.49399	84.4
5	76.4	84.2	84.2	84.9	1	83.9	-1.0	-82.7	7045.0	0.42900	83.3
6	76.3	83.1	83.1	83.9	1	83.1	-0.9	-71.5	6901.3	0.37256	82.2
7	76.2	82.1	82.1	83.1	1	82.3	-0.7	-60.6	6779.5	0.32355	81.3
8	76.0	81.3	81.3	82.3	1	81.7	-0.6	-52.0	6675.0	0.28099	80.4
9	75.9	80.5	80.5	81.7	1	81.3	-0.4	-35.6	6603.7	0.24402	79.7
10	75.7	79.9	79.9	81.3	1	80.7	-0.6	-49.3	6504.7	0.21192	79.1
11	75.6	79.2	79.2	80.7	1	80.2	-0.4	-33.1	6438.3	0.18404	78.5
12	75.5	78.6	78.6	80.2	1	79.9	-0.4	-31.0	6376.2	0.15983	77.9
13	75.3	78.1	78.1	79.9	1	79.5	-0.4	-28.8	6318.4	0.13880	77.5
14	75.2	77.6	77.6	79.5	1	79.2	-0.3	-24.8	6263.7	0.12054	77.0
15	75.1	77.2	77.2	79.2	1	78.9	-0.3	-22.7	6223.1	0.10469	76.6
16	74.9	76.7	76.7	78.9	1	78.6	-0.3	-20.7	6181.7	0.09091	76.3
17	74.8	76.3	76.3	78.6	1	78.4	-0.2	-18.7	6144.2	0.07895	75.9
18	74.7	76.0	76.0	78.4	1	78.2	-0.2	-16.7	6110.8	0.06857	75.6
19	74.5	75.6	75.6	78.2	1	77.9	-0.2	-18.6	6073.6	0.05955	75.4
20	74.4	75.2	75.2	77.9	1						

Extrapolation of the cooling down curve, using the fitting curve $q_w(t) = A_0 - kt + Be^{-(t/T_w)}$



Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

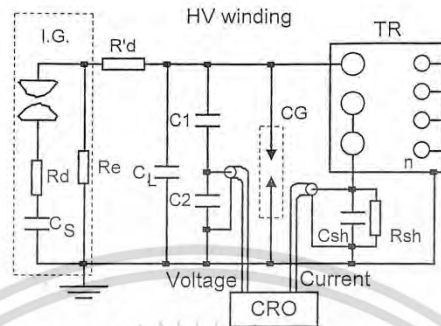
W MANEEWAN
 Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

TF-T1-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Simplified connection diagram of the test arrangement



Description :

I.G. = Impulse generator	HV winding	Stages in series :	2
C_s = Impulse capacitor		Stages in parallel :	3
R_d = Internal series resistance (Ω)		Max. energy (kJ) :	30
R_e = Internal parallel resistance (Ω)			60
$R'd$ = External resistance (Ω)			57
R_1 = Resistance (Ω)			12
R_2 = Resistance (Ω)			-
R_3 = Resistance (Ω)			-
R_{sh} = Current shunt resistance (Ω)			1.00
C_{sh} = Shunt capacitance (pF)			-
C_L = Load capacitance (pF)			3600
C_1, C_2 = Voltage divider		Max. voltage (kV) :	400
		Ratio :	282
CRO = Impulse oscilloscope	TR = Transformer under test	CG = Chopping gap	

Note:1) The voltage at the non - tested winding terminal (R_1, R_2, R_3) are not exceed 75 % of their associated impulse withstand level.

Instrument : Impulse generator Type : E Series Manufacturer : HAEFELY, SWITZERLAND
Impulse oscilloscope Type : MIA 100-14/2B Manufacturer : Highvolt Pruftechnik Presden GmbH

Environment : Pressure 1010 mbar Temperature 30.1 °C Humidity 62 %

Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

W. M. NEE WAN
Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

TF - T1 - 501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Oscillogram

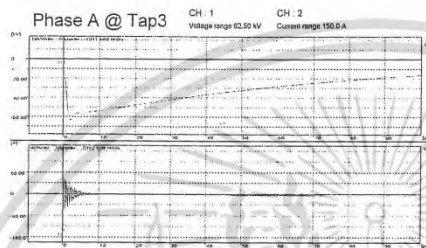
Standard waves shape

T1 = 1.2 us \pm 30%

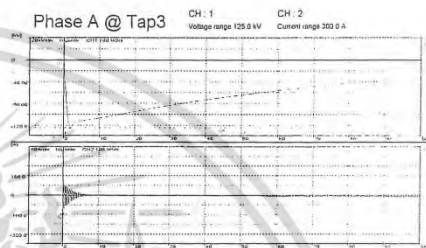
T2 = 50 us \pm 20%

Neutral direct T1 < 13 us

Reduced full wave(50% - 70% of LI level), Full wave(100% of LI level)



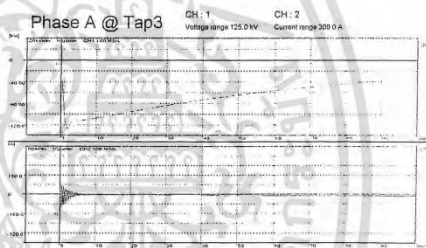
No.01 Reduced full wave voltage
Test voltage: 62.60 kV T1 : 1.465 us T2 : 51.74 us



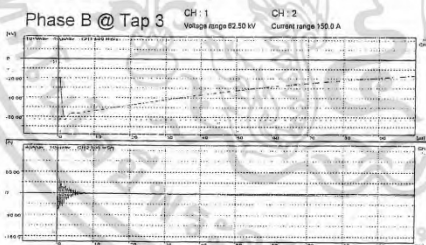
No.02 Full wave voltage
Test voltage: 124.3 kV T1 : 1.457 us T2 : 51.74 us



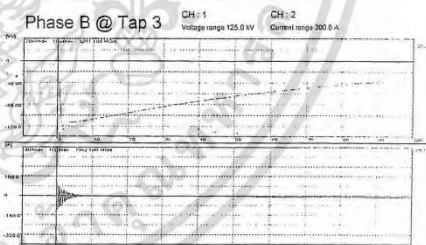
No.03 Full wave voltage
Test voltage: 124.6 kV T1 : 1.460 us T2 : 52.35 us



No.04 Full wave voltage
Test voltage: 124.8 kV T1 : 1.464 us T2 : 52.39 us



No.05 Reduced full wave voltage
Test voltage: 62.54 kV T1 : 1.466 us T2 : 52.36 us



No.06 Full wave voltage
Test voltage: 125.0 kV T1 : 1.462 us T2 : 51.89 us

Serial No. : 600068

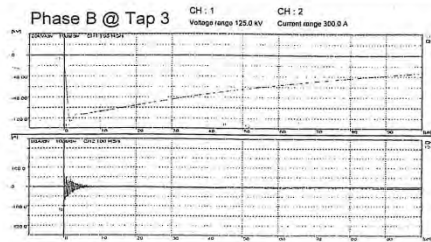
Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

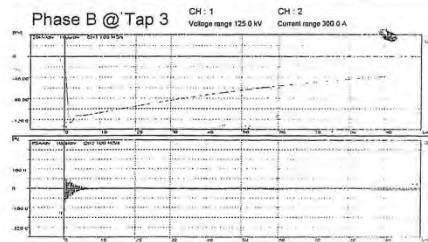
W. MANEEWAN
Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

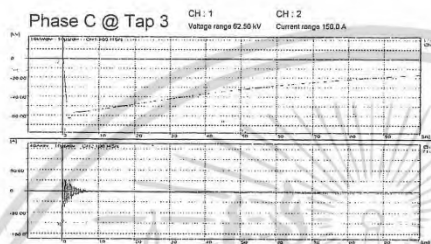
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



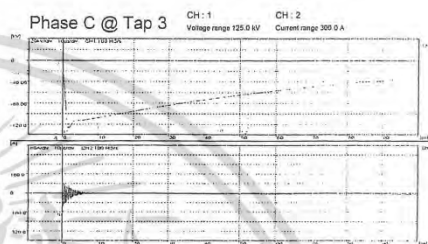
No.07 Full wave voltage
Test voltage: 125.1 kV T1 : 1.466 us T2 : 52.36 us



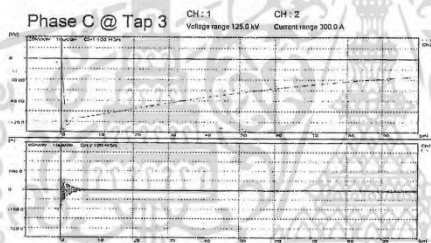
No.08 Full wave voltage
Test voltage: 125.1 kV T1 : 1.465 us T2 : 52.41 us



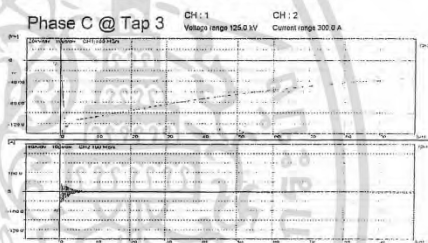
No.09 Reduced full wave voltage
Test voltage: 62.55 kV T1 : 1.452 us T2 : 52.43 us



No.10 Full wave voltage
Test voltage: 125.1 kV T1 : 1.464 us T2 : 51.82 us



No.11 Full wave voltage
Test voltage: 125.1 kV T1 : 1.460 us T2 : 52.36 us



No.12 Full wave voltage
Test voltage: 125.0 kV T1 : 1.462 us T2 : 52.37 us

Acceptance Criteria : The Absence of significant differences between voltage and current transients recorded at reduced voltage and those recorded at full test voltage constitutes evidence that the insulation has withstood the test.

Serial No. : 600068

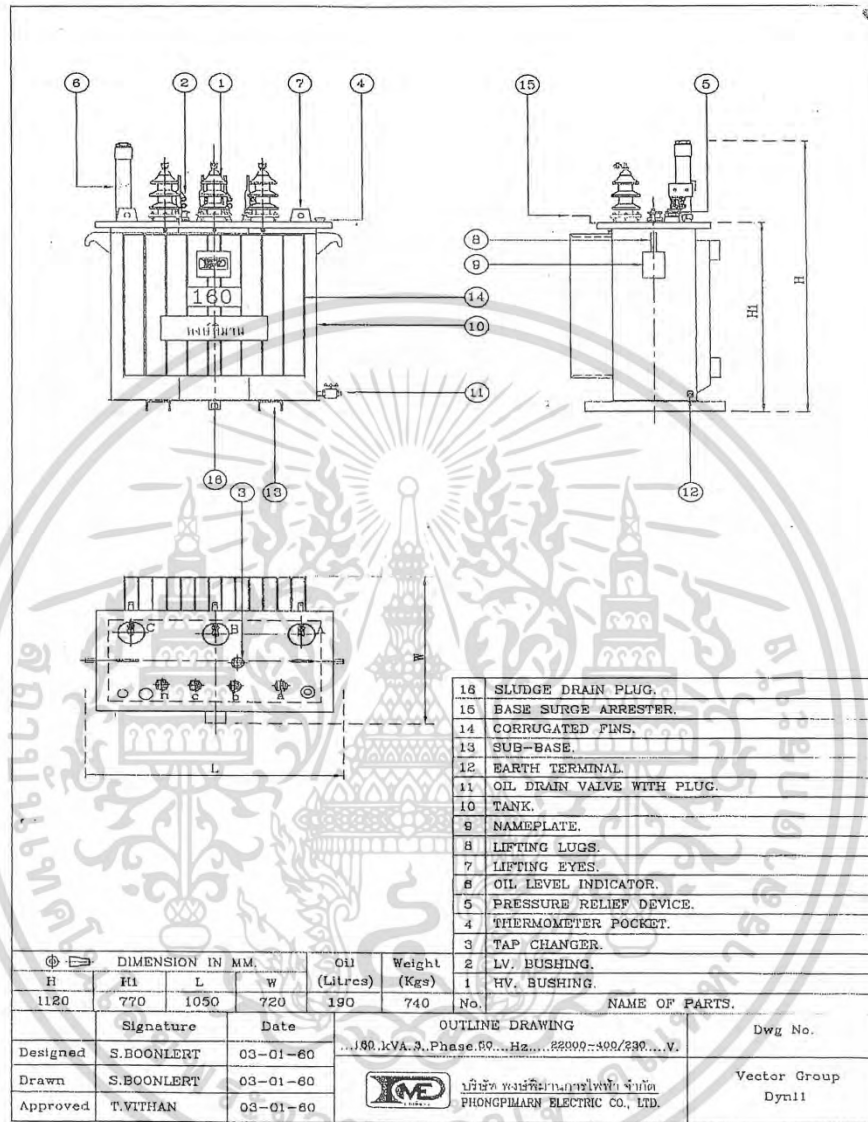
Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

W. MANEELWAN
Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

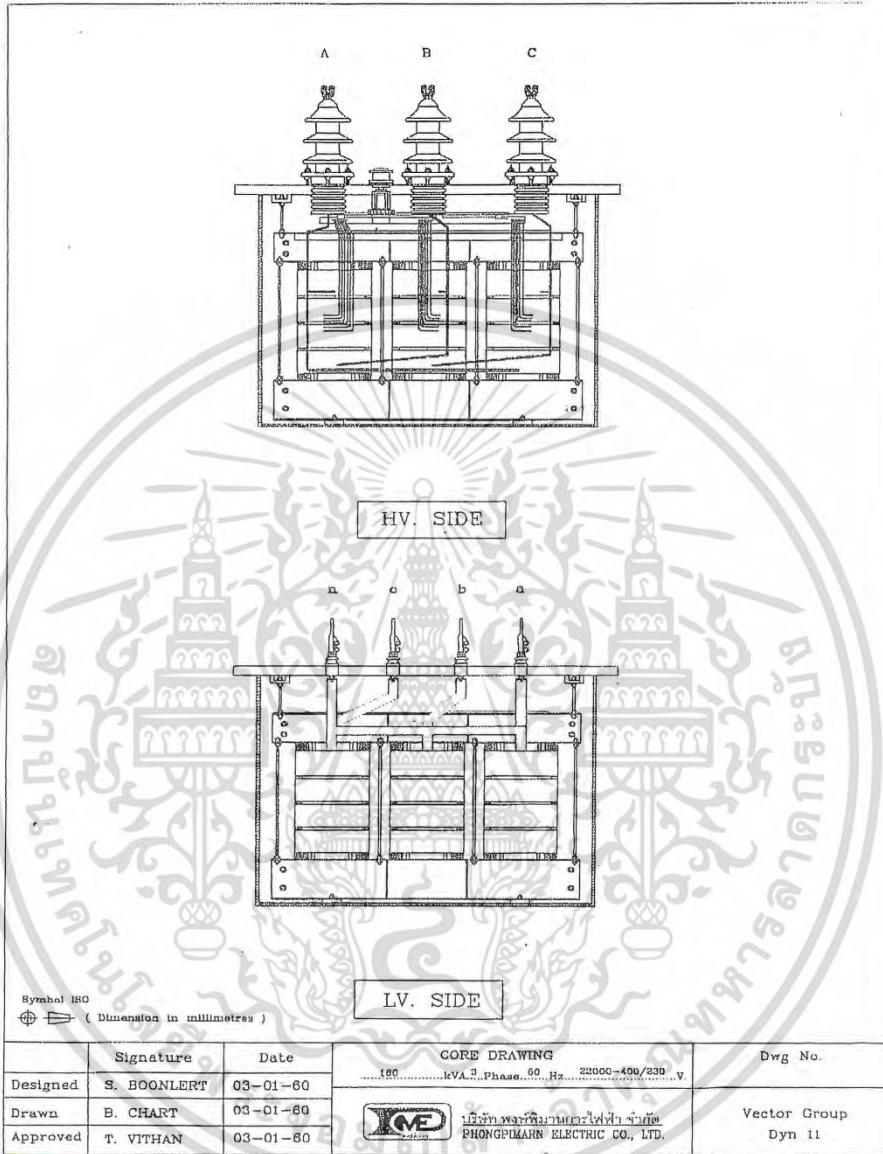
The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

W MANE EWAN
Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

TF - T1 - 501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Serial No. : 600068

Report No. : 60-T013-01

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

พ. มานะวาน
 Electrical Engineer

Rev. 2, August 11, 2016

TF - T1 - 501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


TRANSFORMER TEST REPORT


Customer PHONGPIMARN ELECTRIC CO.,LTD.
Address 42 / 1 M.3 OMNOI, KRATHUM BAEN, SAMUT SAKKHON, 74130

Transformer 250 kVA 3 Phase 50 Hz 22000 - 400 / 230 V
Tapping range +/- 2 X 2.50 %
Cooling type ONAN
Vector group Dyn11
Serial No. 600114
Report No. 60088
Manufacturer PHONGPIMARN ELECTRIC CO.,LTD.
Applied standard Reference Content Page

Control No. 60-T030-01
Receipt date 3 July 2017
Test date 3 - 5 July 2017
Issue date 5 July 2017

Prepared by 
(Mr. Pupan Iamsakul)
Electrical Engineer

Checked by 
(Mr. Manutchai Suguntha)
Electrical Senior Engineer

Approved by 
(Mr. Chalernsak Wuttisela)
Electrical Test Bay Manager

* Test marked(*) *Not TISI Accredited*in this Report/Certificate are not included in the TISI Accreditation Schedule for our Laboratory *

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.

This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Items	Standard	Test Uncertainty	Sheet
- Transformer Test Results	-	-	3
- Measurement of voltage ratio and check of phase displacement	IEC 60076-1 (2011) clause 11.3	-	4
- Measurement of winding resistance	IEC 60076-1 (2011) clause 11.2	-	5
- Measurement of d.c insulation resistance between each winding to earth and between winding	IEEE C57.12.90 (2010) clause 10.11	-	6
-* Insulation oil dielectric strength test	ASTM D1816 - 04 (1997)	-	6
- Applied voltage test (AV)	IEC 60076-3 (2013) clause 11.5	-	7
- Induced voltage withstand test (IVW)	IEC 60076-3 (2013) clause 11.2	-	7
- Measurement of no-load loss and current	IEC 60076-1 (2011) clause 11.5	-	8
- Measurement of short-circuit impedance and load loss	IEC 60076-1 (2011) clause 11.4	-	9
-* Efficiency and Voltage Regulation Calculation	IEC 60076-8 (1997)	-	9
- Temperature Rise Test	IEC 60076-2 (2011) clause 7.0	-	10
- Lightning impulse tests (LI)	IEC 60076-3 (2013) clause 13.2	-	Attachment 1
-* External Clearances in Air Measurement	IEC 60076-3 (2013) clause 16.2	-	Attachment 2
- Outline Drawing	-	-	Attachment 2

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.

Prepared by

This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


Description		Test result	Guarantee	Tolerance
	Base on (kVA)	250	250	
1. Exciting current	(A)	5.137	-	-
	(%)	1.424	-	-
2. No - load loss	(kW)	0.464	-	-
3. Load loss 75 °C , rated tap	(kW)	2.912	-	-
4. Total loss	(kW)	3.376	-	-
5. Imp. Voltage 75 °C , rated tap	(%)	4.17	-	-
6. Temperature rise test				
	Cooling type	ONAN	ONAN	
HV winding temperature rise	(K)	62.1	65.0	-
LV winding temperature rise	(K)	58.7	65.0	-
Oil temperature rise	(K)	53.9	60.0	-



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.


Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement of voltage ratio and check of phase displacement

TAP	System voltage		Ratio	Transformer ratio error in [%]			Note
	HV winding	LV winding		A - B a - n	B - C b - n	C - A c - n	
1	23100	400	100.0	+0.05	+0.06	+0.04	
2	22550	400	97.64	+0.01	+0.03	+0.01	
3	22000	400	95.26	± 0.00	+0.01	± 0.00	
4	21450	400	92.88	+0.04	+0.07	+0.06	
5	20900	400	90.50	+0.08	+0.04	+0.06	

Vector group : Dyn11


Criteria : Deviation not more than $\pm 0.5\%$

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Rev. : 4, April 20, 2016


Electrical Engineer

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement of winding resistance

Temperature

Top oil temp. (T1)	30.6	°C
Upper radiator (T2)	30.3	°C
Lower radiator (T3)	30.0	°C
Average winding temp. = (T1 + T3) / 2 =	30.3	°C

Conductor Material

HV winding material	Copper
LV winding material	Copper

TAP	HV winding (Ω)			Note
	A - B	B - C	C - A	
1	21.819	21.823	21.796	
2	21.240	21.242	21.216	
3	20.661	20.662	20.636	
4	20.099	20.097	20.071	
5	19.538	19.536	19.511	

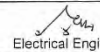
TAP	LV winding (mΩ)			Note
	a - n	b - n	c - n	
-	2.4078	2.4073	2.3945	

TAP	LV winding (mΩ)			Note
	a - b	b - c	c - a	
-	4.7866	4.8076	4.8118	

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.



Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement of d.c insulation resistance between each winding to earth and between winding

 Temperature at 20.0°C : Insulation resistance $\geq 500 \text{ M}\Omega$, P.I. ≥ 1.3

Test voltage (V)	Winding	Measured at 30.9 °C		Corrected at 20 °C		P.I.
		M Ω (1 min)	M Ω (10 min)	M Ω (1 min)	M Ω (10 min)	
2500	HV - G	23300	-	49629	-	-
2500	LV - G	15500	-	33015	-	-
2500	HV+LV - G	15900	-	33867	-	-

Insulation oil dielectric strength test

Electrode type : Mushroom

Gap distance : 2.0 mm

ASTM D1816 - 84a Breakdown voltage > 50 kV

ASTM D1816 : $s/\bar{x} \leq 0.1$


Test No.	1	2	3	4	5	Average (\bar{x})	STDV (s)	s/\bar{x}
Breakdown (kV)	61.0	50.2	55.8	57.8	63.7	57.7	5.17	0.09



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.


Electrical Engineer

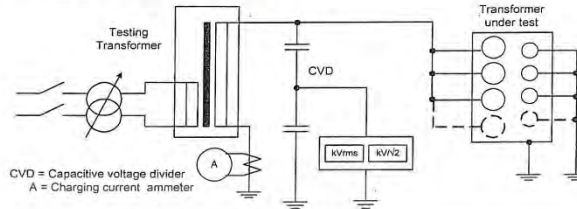
Rev. : 4. April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Applied voltage test (AV)

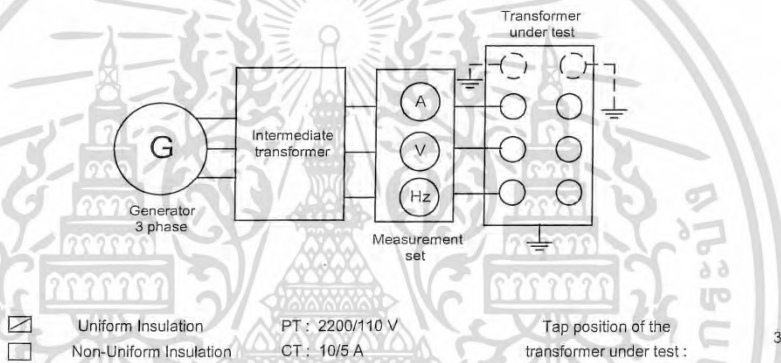
Simplified connection diagram of the test arrangement



Winding	Earth	Frequency (Hz)	Voltage (kV)	Current (mA)	Time (sec.)	Test result
HV	LV, Core, Clamp, CT, Tank	50	50	42.0	60	Withstood
LV	HV, Core, Clamp, CT, Tank	50	3	0.0	60	Withstood

Induced voltage test with partial discharge measurement (IWW)

Simplified connection diagram of the test arrangement



Supply (kV)	Induce Voltage (kV)	Frequency (Hz)	Time(sec)	Test Result
LV winding	HV winding			
0.800	44	200	30	Withstood

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement of no-load loss and current

Condition : Supplied voltage to LV winding and HV winding open circuit

Base on : 250 kVA

Multiplier : Voltage PT = Direct

Current CT = Direct


%	Test voltage			Current measurement Multiplier = 1				No - load loss measurement Multiplier = 1				Correction Loss (kW)
	Voltage (V)	Volt. rms.	Volt. mean.	I1	I2	I3	Excit. (A)	W1	W2	W3	Loss (kW)	
100	400	399.14	399.76	5.5942	4.1965	5.6214	5.137	256.8	142.2	64.3	0.463	0.464



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.


Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement of short-circuit impedance and load loss

Condition : Supplied current to HV winding and LV winding short circuit
 Base on : 250 kVA Reference temp : 75.0 °C
 Multiplier: Voltage PT = 2200 / 110 V Temp. factor : 1.163
 Current CT = 10 / 5 A

Multiplier	20			2			40		
	Measurement								
Tap	Voltage (V)	Current (A)	Loss (kW)	@ 31.5 °C		Σ I ² R loss (kW)	Load loss (kW)	Correction loss (kW)	Load Impedance (%)
				R _{HV} (Ω)	R _{LV} (mΩ)				
3	909.56	6.5601	2581.2	20.756	4.826	2.283	2.582	2.912	4.17

Efficiency

Tap	No load Loss (kW)	Load loss (kW)				Efficiency at PF = 1 (%)			
		pu = 1.0	pu = .75	pu = .50	pu = .25	pu = 1.0	pu = .75	pu = .50	pu = .25
3	0.464	2.912	1.638	0.728	0.182	98.67	99.17	99.53	99.74

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{Rated Power}}{\text{Rated Power} + \text{No-load loss} + \text{pu}^2 \times \text{Load loss}} \times 100 (\%)$$

Voltage Regulation

Tap	pu	%Z	%R	%X	Voltage regulation (%)	
					PF = 1	PF = 0.8
3	1.00	4.17	1.165	4.00	1.245	3.366

$$\text{Voltage Regulation} = n \times p + \frac{(nq)^2}{200} (\%)$$

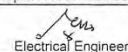
Where

- n = pu (per-unit load)
- p = %R cos δ + %X sin δ
- q = %R sin δ - %X cos δ
- cos δ = Power factor
- sin δ = $\sqrt{1 - \cos^2 \delta}$

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.



Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

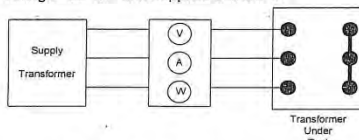
TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature rise test

Test condition : System Voltage 22 kV and supplied current to

HV side at Tap 3



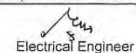
Simplified connection diagram

Characteristic of transformer	Description
- Rated capacity	(kVA) 250
HV rated current	(Amp) 6.561
LV rated current	(Amp) 360.9
No-load loss	(kW) 0.464
Load loss Tap 3	(kW) 2.912
Total loss	(kW) 3.376
- Injected Current & Power	
HV test current (as measured)	(Amp) 6.561
LV test current (calculation)	(Amp) 360.86
Test loss	(kW) 3.375
- Air temperature	
Aver. ambient temperature(θ_{as}) @steady state.	(°C) 31.2
Aver. ambient temperature(θ_{ae}) @end of period total loss.	(°C) 29.8
Aver. ambient temperature(θ_{at}) @instant shutdown.	(°C) 29.9
- Oil temperature	
Top oil temperature (θ_o)	(°C) 83.7
Average oil temperature (θ_{om})	(°C) 73.6
(Total loss / Test loss) ^X	(Cw) 1.000
	X = 0.8
Corrected value	
$\Delta\theta_o \times C_w$	(°C) 53.9
$\Delta\theta_{om} \times C_w$	(°C) 43.8
- Windings & Windings above oil temperature	
Winding under test	HV LV
Average winding temperature uncorrected (θ_2)	(°C) 91.5 88.1
Average liquid fall during 1h ($\Delta\theta_{ofm}$)	(°C) 0.4 0.4
Average winding to liquid gradient (g)	(K) 17.9 14.5
(Rated current / Test current) ^Y	(Ci) 1.000 1.000
	Y = 1.6
Corrected value	
HV g x Ci	(K) 17.9 -
LV g x Ci	(K) - 14.5
Average winding temperature corrected (θ_w)	(°C) 91.9 88.5
- Conclusion	
Top oil temperature rise ($\Delta\theta_o$)	(K) 53.9 / 60.0
HV Average - winding temperature rise ($\Delta\theta_w$)	(K) 62.1 / 65.0
LV Average - winding temperature rise ($\Delta\theta_w$)	(K) 58.7 / 65.0

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.



Rev. : 4, April 20, 2016

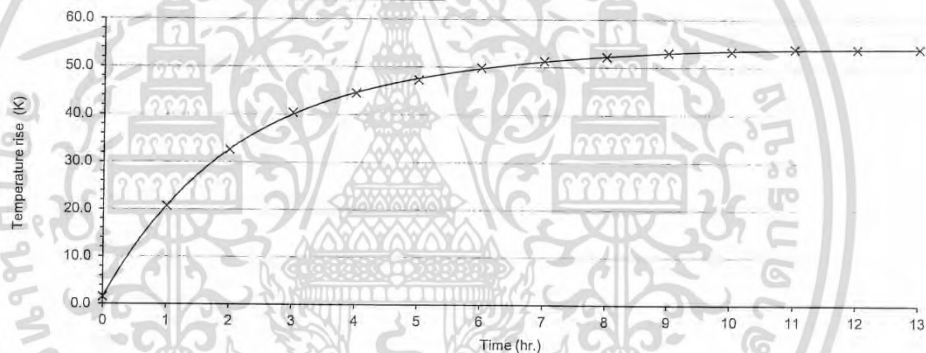
TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Condition : Load loss test Cooling type : ONAN Use fan unit : -

Time (hour)	Voltage (V)	Current (Amp)	Test loss (kW)	Top oil			Ambient Temperature					Top oil temp. rise	Average oil temp. rise
				T1 (°C)	Upper Radiator T2 (°C)	Lower Radiator T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)	Average		
0	1041	7.492	3.376	30.9	30.2	29.7	29.4	29.3	29.9	28.9	29.4	1.5	0.9
1	1000	7.157	3.376	50.2	47.2	38.9	29.5	29.4	30.0	29.0	29.5	20.7	15.1
2	990	7.054	3.376	62.1	58.4	47.8	29.6	29.4	30.0	29.1	29.5	32.6	25.5
3	982	6.984	3.376	70.0	65.5	53.4	29.7	29.4	30.1	29.1	29.6	40.4	32.1
4	977	6.945	3.376	74.2	69.7	56.6	29.8	29.5	30.2	29.3	29.7	44.5	35.7
5	974	6.926	3.373	77.2	72.3	58.8	30.0	29.6	30.3	29.5	29.9	47.3	38.1
6	974	6.886	3.378	79.8	74.6	60.6	30.0	29.7	30.4	29.5	29.9	49.9	40.3
7	972	6.901	3.382	81.2	76.0	61.6	30.0	29.7	30.4	29.5	29.9	51.3	41.5
8	972	6.902	3.385	82.1	77.0	62.3	30.0	29.7	30.4	29.5	29.9	52.2	42.3
9	969	6.873	3.374	82.9	77.6	62.7	30.0	29.7	30.4	29.5	29.9	53.0	42.9
10	967	6.868	3.374	83.2	78.0	63.1	30.0	29.6	30.4	29.5	29.9	53.3	43.3
11	969	6.869	3.375	83.7	78.3	63.4	30.0	29.6	30.3	29.5	29.9	53.8	43.7
12	969	6.849	3.376	83.6	78.5	63.3	30.0	29.6	30.3	29.4	29.8	53.8	43.7
13	968	6.866	3.375	83.7	78.5	63.5	29.8	29.5	30.3	29.4	29.8	53.9	43.8
Reduce to rated current													
13	926	6.574	3.094	83.7	78.5	63.5	29.8	29.5	30.3	29.4	29.8	53.9	43.8
14	923	6.561	3.068	83.1	78.3	63.2	29.9	29.6	30.4	29.5	29.9	53.2	43.3
Shutdown measure R _{LV} & R _{UV}													


Top oil temperature



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.


Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HV winding resistance = 20.745 Ω
 LV winding resistance = 4.797 m Ω
 Temperature = 31.2 $^{\circ}\text{C}$

Winding Resistance After Shutdown


Condition : Load loss test Condition :
 Cooling type : ONAN Cooling type :

time (min)	HV Winding(Ω)	LV Winding(m Ω)	HV Winding(Ω)	LV Winding(m Ω)	HV Winding(Ω)	LV Winding(m Ω)
0						
1						
2						
3	25.220	5.7736				
4	25.151	5.7587				
5	25.087	5.7453				
6	25.026	5.7329				
7	24.968	5.7212				
8	24.914	5.7106				
9	24.862	5.7007				
10	24.813	5.6912				
11	24.764	5.6821				
12	24.719	5.6736				
13	24.676	5.6654				
14	24.633	5.6574				
15	24.593	5.6500				
16	24.555	5.6429				
17	24.517	5.6359				
18	24.481	5.6293				
19	24.446	5.6228				
20	24.411	5.6162				

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.


 Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

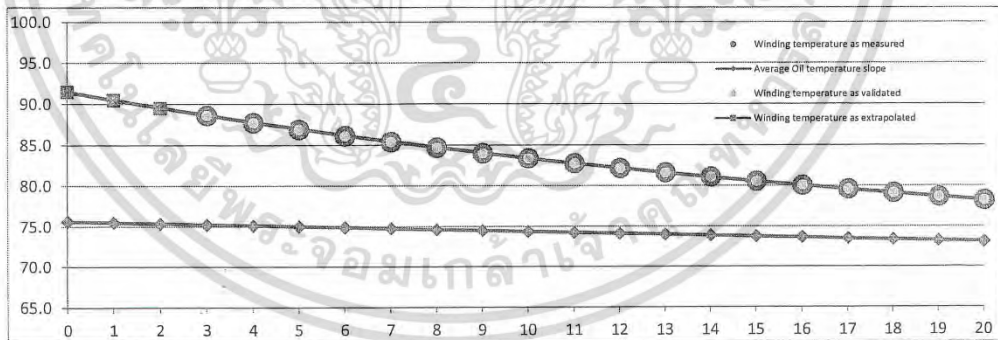
-Example of cooling down curve calculation spreadsheet

Legend : Data to be inserted
 Time interval Dt= 1 min
 Initial average-liquid temp. θ_{om_start} = 73.7 °C
 Final average liquid temp. θ_{om_end} = 71.2 °C
 Liquid temperature slope. k = 0.125 K/min
 Estimated winding time constant Tw= 17.7 min
 Estimated average liquid temp. A_0 = 75.6 °C
 Estimated winding-to-liquid gradient B= 15.8 K
 Average winding temp.at the instant of shut-down. θ_{wo} = 91.5 °C

Auxiliary variables:
 $tc = -4.39569$
 $te = 0.0581174$

Time (min)	$\theta_{om(i)}$ Ao-kt	$\theta_{wm(i)}$ as measured	$\theta_{wval(i)}$	$\theta_{wcor(i)}$	ν (0/1)	$\theta_{w(i)}$ as corrected and Validated	$\Delta\theta_{w(i)}$ as Per eq. (C.5)	$\theta_{w(i)} \times \Delta\theta_{w(i)}$	$(\theta_{w(i)})^2$	$e^{-i/Tw}$	$\theta_{w(i)}$ as calculated
0	75.6	0	0	0.0							91.5
1	75.5	0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0	90.5
2	75.4	0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0	89.5
3	75.3	88.6	88.6	89.0	1	0.0	0	0.0	0	0	88.6
4	75.1	87.7	87.7	88.2	1	88.2	-0.8	-67.1	7785.9	0.79775	87.8
5	75.0	86.9	86.9	87.5	1	87.5	-0.7	-61.0	7663.5	0.75393	87.0
6	74.9	86.1	86.1	86.9	1	86.9	-0.7	-57.1	7548.8	0.71252	86.2
7	74.8	85.4	85.4	86.3	1	86.3	-0.6	-53.4	7441.6	0.67338	85.4
8	74.6	84.7	84.7	85.7	1	85.7	-0.6	-48.7	7343.9	0.63640	84.7
9	74.5	84.0	84.0	85.2	1	85.2	-0.5	-46.2	7251.3	0.60144	84.0
10	74.4	83.4	83.4	84.7	1	84.7	-0.5	-42.6	7165.7	0.56841	83.4
11	74.3	82.8	82.8	84.1	1	84.1	-0.5	-42.4	7080.7	0.53719	82.8
12	74.1	82.2	82.2	83.7	1	83.7	-0.5	-37.9	7004.8	0.50768	82.2
13	74.0	81.6	81.6	83.3	1	83.3	-0.4	-35.5	6933.5	0.47980	81.6
14	73.9	81.1	81.1	82.8	1	82.8	-0.4	-35.4	6862.6	0.45345	81.1
15	73.8	80.6	80.6	82.5	1	82.5	-0.4	-32.0	6798.4	0.42854	80.6
16	73.6	80.1	80.1	82.1	1	82.1	-0.4	-29.8	6738.8	0.40500	80.1
17	73.5	79.6	79.6	81.7	1	81.7	-0.4	-29.6	6679.4	0.38276	79.6
18	73.4	79.1	79.1	81.4	1	81.4	-0.3	-27.4	6624.4	0.36173	79.1
19	73.3	78.7	78.7	81.1	1	81.1	-0.3	-26.3	6571.7	0.34187	78.7
20	73.1	78.2	78.2	80.7	1	80.7	-0.3	-26.2	6519.3	0.32309	78.3

Extrapolation of the cooling down curve, using the fitting curve $q_w(t) = A_0 - kt + Be^{(-t/Tw)}$



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20,2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



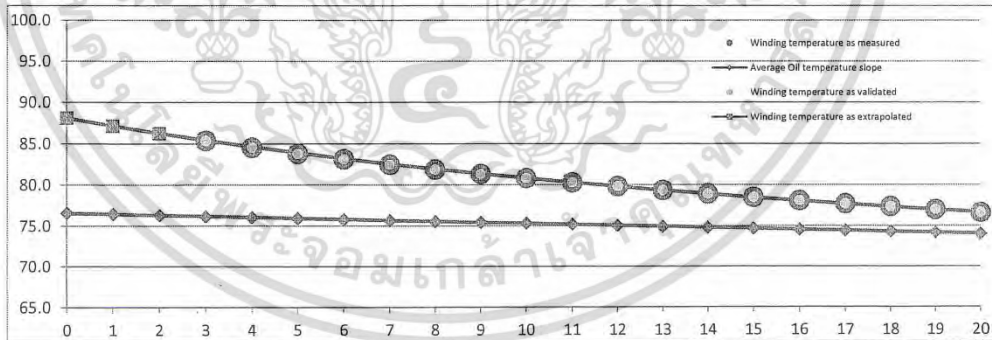
-Example of cooling down curve calculation spreadsheet

Legend : Data to be inserted
 Time interval Dt= 1 min
 Initial average-liquid temp. q_{om_start} = 73.7 °C
 Final average liquid temp. q_{om_end} = 71.2 °C
 Liquid temperature slope. k = 0.125 K/min
 Estimated winding time constant Tw= 13.5 min
 Estimated average liquid temp. A_0 = 76.6 °C
 Estimated winding-to-liquid gradient B= 11.5 K
 Average winding temp.at the instant of shut-down. q_{wo} = 88.1 °C

Auxiliary variables:
 $tc = -5.892567$
 $te = 0.0769562$

Time (min)	$\theta_{om(i)}$ As-kt	$\theta_{wm(i)}$ as measured	$\theta_{wval(i)}$	$\theta_{wcor(i)}$	$\theta_{w(i)}$ as corrected and Validated	$\Delta\theta_{w(i)}$ as Per eq. (C.5)	$\theta_{w(i)} \times \Delta\theta_{w(i)}$	$(\theta_{w(i)})^2$	e^{-i/T_w}	$\theta_{w(i)}$ as calculated
0	76.6	0	0	0.0	0	0	0	0	0	88.1
1	76.4	0	0	0.0	0	0	0	0	0	87.1
2	76.3	0	0	0.0	0	0	0	0	0	86.3
3	76.2	85.4	85.4	85.8	1	0.0	0	0	0	85.4
4	76.1	84.6	84.6	85.1	1	85.1	-0.7	-59.7	7236.5	84.6
5	75.9	83.8	83.8	84.4	1	84.4	-0.6	-52.2	7131.6	83.9
6	75.8	83.1	83.1	83.9	1	83.9	-0.6	-47.2	7036.8	83.2
7	75.7	82.5	82.5	83.4	1	83.4	-0.5	-43.7	6949.2	82.6
8	75.6	81.9	81.9	82.9	1	82.9	-0.5	-38.4	6872.1	81.9
9	75.4	81.3	81.3	82.5	1	82.5	-0.4	-35.0	6802.0	81.4
10	75.3	80.8	80.8	82.1	1	82.1	-0.4	-33.0	6735.8	80.8
11	75.2	80.3	80.3	81.7	1	81.7	-0.4	-31.0	6673.6	80.3
12	75.1	79.8	79.8	81.3	1	81.3	-0.3	-28.2	6617.0	79.8
13	74.9	79.4	79.4	81.0	1	81.0	-0.3	-26.7	6563.5	79.3
14	74.8	78.9	78.9	80.7	1	80.7	-0.3	-25.7	6511.9	78.9
15	74.7	78.5	78.5	80.4	1	80.4	-0.3	-23.0	6465.9	78.5
16	74.6	78.1	78.1	80.1	1	80.1	-0.3	-21.6	6422.7	78.1
17	74.4	77.8	77.8	79.9	1	79.9	-0.3	-21.0	6380.5	77.7
18	74.3	77.4	77.4	79.6	1	79.6	-0.2	-19.2	6342.0	77.4
19	74.2	77.0	77.0	79.4	1	79.4	-0.2	-18.7	6304.5	77.0
20	74.1	76.7	76.7	79.2	1	79.2	-0.2	-19.1	6266.3	76.7

Extrapolation of the cooling down curve, using the fitting curve $q_w(t) = A_0 - kt + Be^{-t/T_w}$



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Electrical Engineer

Rev.: 4, April 20,2016

TF-T0-501


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

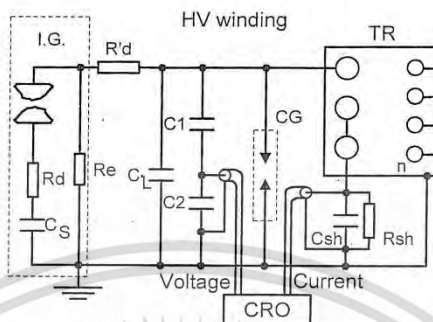

Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Simplified connection diagram of the test arrangement



Description :

I.G. = Impulse generator	HV winding	Stages in series :	1
C_s = Impulse capacitor		Stages in parallel :	2
R_d = Internal series resistance (Ω)		Max. energy (kJ) :	60
R_e = Internal parallel resistance (Ω)			
$R'd$ = External resistance (Ω)			70
R_1 = Resistance (Ω)			-
R_2 = Resistance (Ω)			-
R_3 = Resistance (Ω)			-
R_{sh} = Current shunt resistance (Ω)			2.2
C_{sh} = Shunt capacitance (pF)			-
C_L = Load capacitance (pF)			800
C_1, C_2 = Voltage divider		Max. voltage (kV) :	400
		Ratio :	278
CRO = Impulse oscilloscope	TR = Transformer under test	CG = Chopping gap	

Note:1) If blocking resistors are used the voltage at the non - tested winding terminal (R_1, R_2, R_3) are not exceed 75 % of their associated impulse withstand level.

Acceptance Criteria : The Absence of significant differences between voltage and current transients recorded at reduced voltage and those recorded at full test voltage constitutes evidence that the insulation has *withstood* the test.

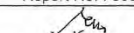
Instrument : Impulse generator Type : SGVA 2400 kV - 360 kJ Manufacturer : HAEFELY, SWITZERLAND
Impulse oscilloscope Type : HIAS 743 Manufacturer : HAEFELY, SWITZERLAND

Environment : Pressure 1010 mbar Temperature 30 °C Humidity 63 %

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.


Electrical Engineer

Rev. : 4, April 19, 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Oscillogram

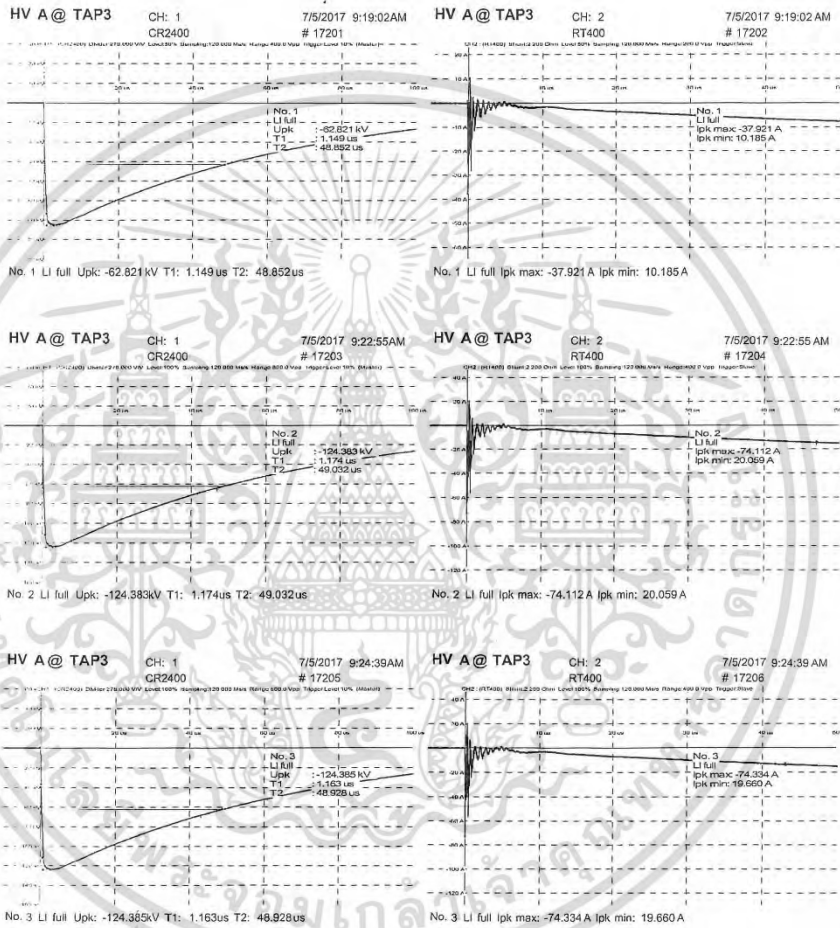
Standard waves shape

T1 = 1.2 us ± 30%

T2 = 50 us ± 20%

Neutral direct T1 < 13 us

Reduced full wave(50% - 70% of LI level), Full wave(100% of LI level)



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

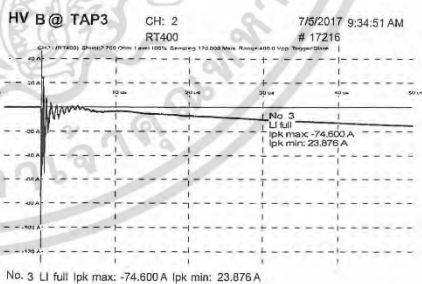
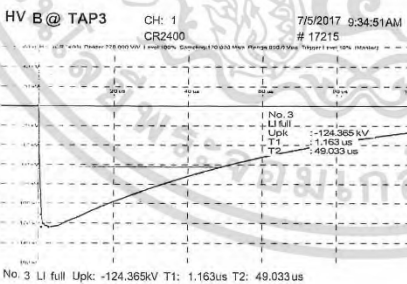
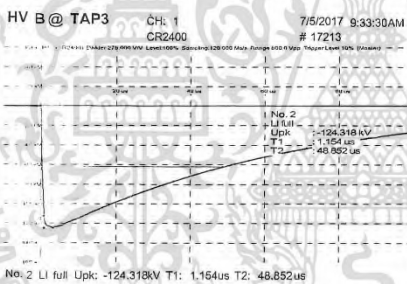
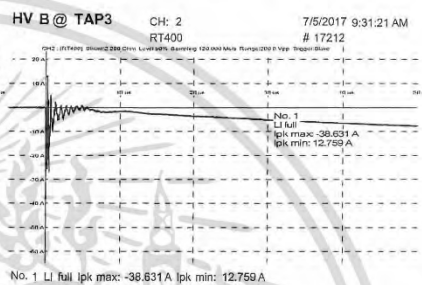
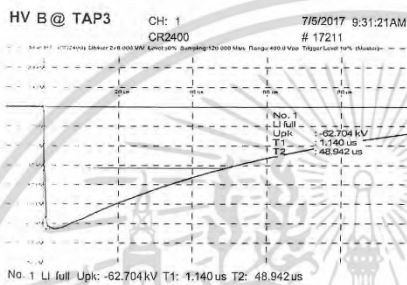
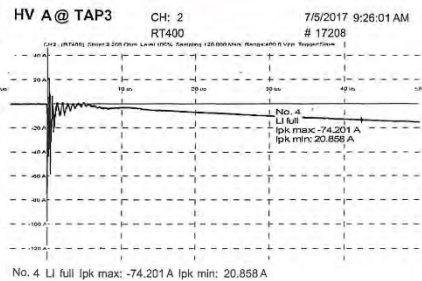
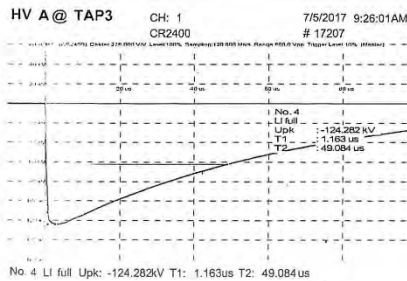
The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

[Signature]
Electrical Engineer

Rev. : 4, April 19, 2016

TF - T0 - 501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

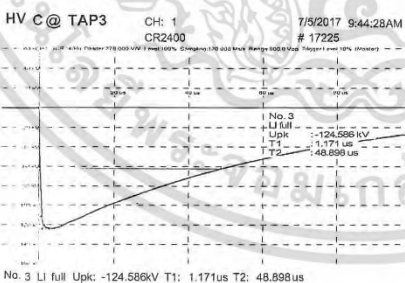
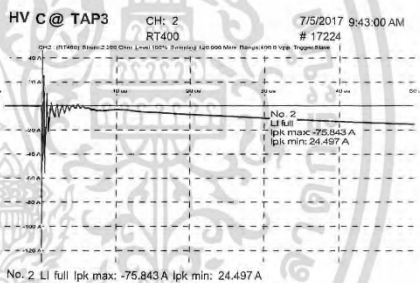
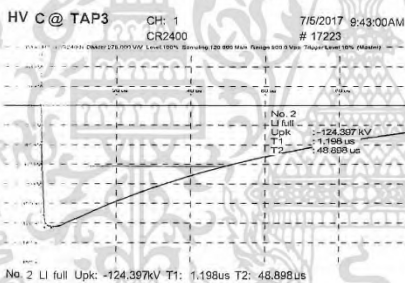
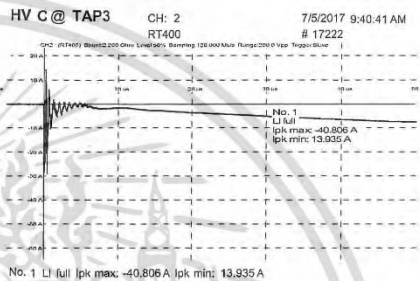
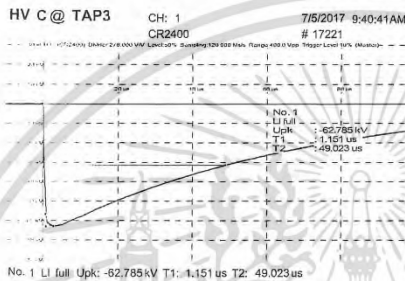
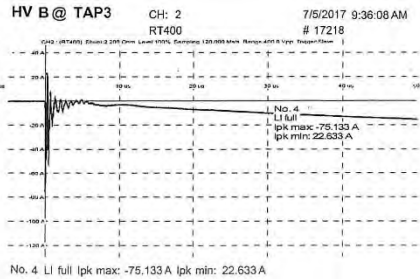
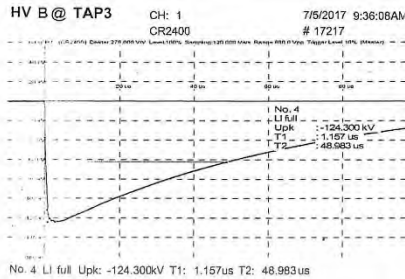
The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

[Signature]
Electrical Engineer

Rev. : 4, April 19, 2016

TF - T0 - 501


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

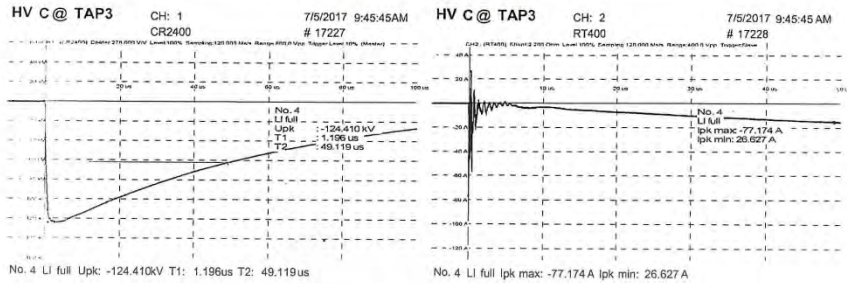
The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.


Electrical Engineer

Rev. : 4, April 19, 2016

TF - T0 - 501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.



Electrical Engineer

Rev. : 4, April 19, 2016

TF - T0 - 501


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.


Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PHONGPIMARN ELECTRIC CO., LTD.

OIL IMMERSED OUTDOOR TRANSFORMER

kVA	2500	Fac. SN	PH00112
HV	22000 V	LV	400/230 V
HV BIL	125 kV	LV BIL	45 kV
HV CURRENT	125 A	LV CURRENT	45 A
TYPE OF COOLING	ONAN	STANDARD	IEC 60076-1
PHASE	A	FREQUENCY	50 Hz
CLASS	A	IMP. VOLT. AT	100 V
OIL TEMP. RISE	55 K	OIL	100 V
WIND TEMP. RISE	55 K	UNTANK MASS	100 V
MAX. AMP. TEMP.	40 °C	TOTAL MASS	100 V
		YEAR	2017

Connection Diagram: Vector Diagram:

TAP	CONNECTION	TAP VOLTAGE	INSULATING LIQUID	CONTRACT
1	5-4	100%	MINERAL OIL	NA
2	4-1	100%	MINERAL OIL	PEA CODE
3	6-1	100%	MINERAL OIL	PEA CODE
4	6-2	100%	MINERAL OIL	PEA CODE

Phase - Ground (mm.)

A - G	B - G	C - G	a - G	b - G	c - G	n - G
250	250	245	60	60	62	60

Phase - Phase (mm.)

A - B	B - C	a - b	b - c	c - n
255	265	135	135	135

Phase HV - Phase LV (mm.)

A - a	A - b	A - c	A - n
265	325	455	615
B - a	B - b	B - c	B - n
355	265	275	365
C - a	C - b	C - c	C - n
605	445	325	265

Minimum Clearances in Air for standard IEC 60076 clause 16.2
 24 kV 400 V
 220 mm. -

Oil Quantity : 216 litre
 Total Mass : 967 kg

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

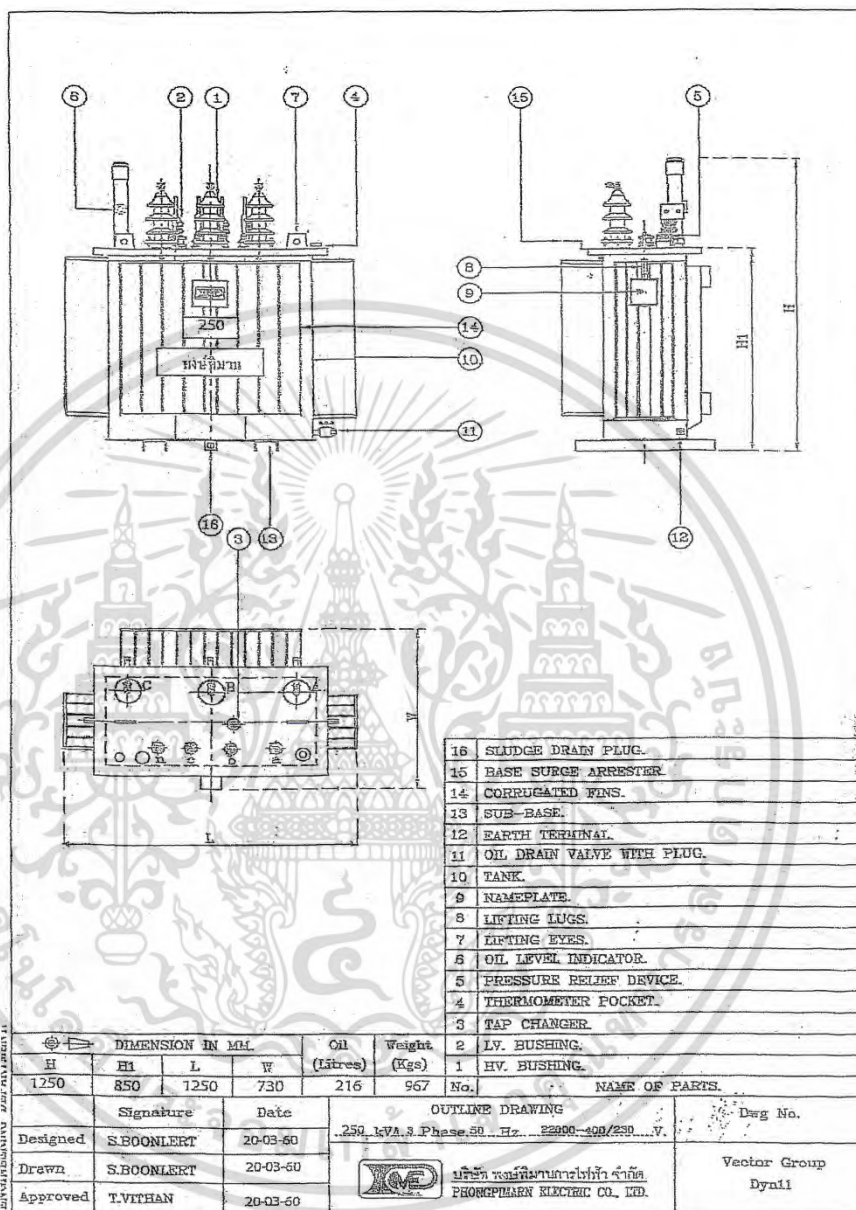
The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

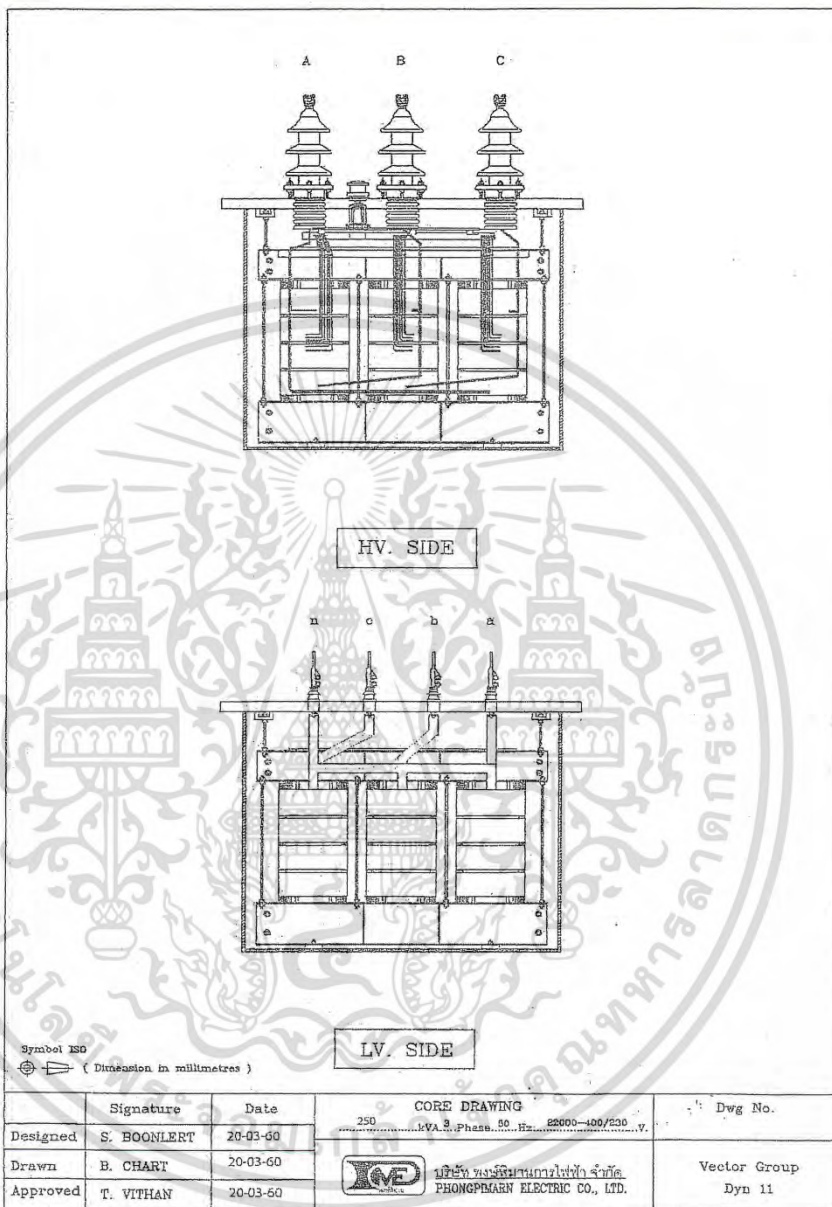
The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHONGPIMARN ELECTRIC CO., LTD.																												
OIL IMMERSED OUTDOOR TRANSFORMER																												
KVA: 250 HV: 22000 V HV BIL: 125 kV HV CURRENT: 0.50 A TYPE OF COOLING: ONAN PHASE: 3 CLASS: A OIL TEMP. RISE: 50 K WIND. TEMP. RISE: 55 K MAX. AMB. TEMP.: 40 °C	Foc.SN.: 600114 LV: 400/230 V LV BIL: 300 kV LV CURRENT: 300.85 A STANDARD: TIS 384 FREQUENCY: 50 Hz IMP. VOLT. AT: 75 % OIL: 216 L. UNTANK MASS: 611 kg TOTAL MASS: 967 kg YEAR: 2017																											
Connection Diagram 	Vector Diagram <p style="text-align: center;">Connection Dyn11</p>																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">HV SIDE</th> <th colspan="2">INSULATING LIQUID MINERAL OIL</th> </tr> <tr> <th>TAP</th> <th>CONNECTION</th> <th>TAP VOLTAGE</th> <th colspan="2">CONDUCTOR MATERIAL COPPER</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>5 - 4</td> <td>23100</td> <td colspan="2" rowspan="5" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> CONTRACT No. _____ PEA CODE: _____ No. ASE-104 </td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>5 - 3</td> <td>22550</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>6 - 3</td> <td>22000</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>6 - 2</td> <td>21450</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>7 - 2</td> <td>20900</td> </tr> </tbody> </table>	HV SIDE			INSULATING LIQUID MINERAL OIL		TAP	CONNECTION	TAP VOLTAGE	CONDUCTOR MATERIAL COPPER		1	5 - 4	23100	CONTRACT No. _____ PEA CODE: _____ No. ASE-104		2	5 - 3	22550	3	6 - 3	22000	4	6 - 2	21450	5	7 - 2	20900	
HV SIDE			INSULATING LIQUID MINERAL OIL																									
TAP	CONNECTION	TAP VOLTAGE	CONDUCTOR MATERIAL COPPER																									
1	5 - 4	23100	CONTRACT No. _____ PEA CODE: _____ No. ASE-104																									
2	5 - 3	22550																										
3	6 - 3	22000																										
4	6 - 2	21450																										
5	7 - 2	20900																										
Symbol ISO (Dimension in millimetres)																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Signature</th> <th>Date</th> <th>TITLE :</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Drawn.</td> <td>S.BOONLERT</td> <td>20-03-60</td> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;"> NAME PLATE 250kVA 22000-400/230 V </td> </tr> <tr> <td>Checked.</td> <td>S.BOONLERT</td> <td>20-03-60</td> </tr> <tr> <td>Approved.</td> <td>T.VITHAN</td> <td>20-03-60</td> </tr> </tbody> </table>		Signature	Date	TITLE :	Drawn.	S.BOONLERT	20-03-60	NAME PLATE 250kVA 22000-400/230 V	Checked.	S.BOONLERT	20-03-60	Approved.	T.VITHAN	20-03-60														
	Signature	Date	TITLE :																									
Drawn.	S.BOONLERT	20-03-60	NAME PLATE 250kVA 22000-400/230 V																									
Checked.	S.BOONLERT	20-03-60																										
Approved.	T.VITHAN	20-03-60																										
DRAWING SECTION Drawing No. ASE-104P	บริษัท พงษ์พิภพการไฟฟ้า จำกัด PHONGPIMARN ELECTRIC CO., LTD.																											
	Note : _____ Page : _____																											

Serial No. : 600114

Report No. : 60088

The result in this Test Report relates only to the unit of transformer and item tested.
 This Test Report does not be reproduced other than in full except with the permission of TIRATHAI laboratory.

Electrical Engineer

Rev. : 4, April 20, 2016

TF-T0-501

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The logo of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst is a traditional Thai architectural structure, possibly a stupa or a temple entrance, flanked by two ornate pillars. The entire emblem is surrounded by a circular border containing Thai text. The text at the top of the border reads "มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์" (Mahavithayalai Rajabhat Buriram) and the text at the bottom reads "พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง" (Prachonkhae Jao Kun Thara Ladkrabang).

ภาคผนวก ค


Specification No. RTRN-035/2558

Three-Phase Transformer for 22 kV and 33 kV


Distribution Systems with Ability

to Withstand Short Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 1 of 20
<p>Invitation to Bid No.:</p> <p>C Material, equipment, and specifications for THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT</p> <p>C1 General material and packing instructions Additional to the general instructions, the following shall be observed:</p> <p>1a Scope These specifications cover three-phase transformers, oil-immersed, natural self-cooled, power range from 50 kVA to 2,000 kVA, designed and constructed to withstand without damage the thermal and dynamic effects of external short circuits, suitable for outdoor installation on 22 kV and 33 kV 50 Hz distribution systems.</p> <p>1b Standards The transformers shall be manufactured and tested in accordance with the latest edition of the following standards:</p> <p>Thailand Industrial Standard (TIS) TIS 384 Power Transformers</p> <p>International Electrotechnical Commission (IEC) IEC 60076-1 Power transformers – Part 1: General IEC 60076-5 Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit</p> <p>And all other relevant standards, unless otherwise specified in these specifications. LV bushings shall be in accordance with the DIN 42530, unless otherwise specified in these specifications. The transformer oil shall be in accordance with the latest IEC 60296. PEA will accept the type test reports carried out according to previous standard/edition, if there is no significant change in any item or no additional test item compared with the last standard/edition. On the other hand, if there are significant(s) and/or additional test item(s), PEA will remain to accept the type test reports carried out according to previous standard/edition for three (3) years. After three (3) years, the type testing shall be done to complete type test reports for the changed and/or additional test item(s) including related item(s) (if any).</p>				
II				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 การไฟฟ้านครหลวง PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY	PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY			
TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 2 of 20

1c Principal requirement

1c.1 Service conditions and installation

The transformers shall be designed and constructed for outdoor installation and operation under the following conditions:

Altitude	: up to 1,000 m above sea level
Ambient air temperature	: 40°C, maximum
	: 30°C, monthly average, of the hottest month
Relative humidity	: up to 94 %
Climate condition	: tropical climate

Transformer Rating (kVA)	Installation
50 – 250	on concrete pole and on platform
315 – 1,500	on platform and on concrete foundation
2,000	on concrete foundation

1c.2 Oil preservation system

The transformers of 50 kVA to 500 kVA shall be permanently sealed and completely oil filled system (without gas cushion) type (usually corrugated tank). The transformer tank cover shall be bolt tightened to the tank with suitable gasket sealing.

The transformers of 630 kVA to 2,000 kVA shall be conservator system type.

1c.3 Rating

1. Rated power

The rated power, on continuous operation, for transformers shall be as follows:

50 kVA	500 kVA
100 kVA	630 kVA
160 kVA	1,000 kVA
250 kVA	1,250 kVA
315 kVA	1,500 kVA
400 kVA	2,000 kVA


2. Rated voltages

Rated Primary Voltage	Rated Secondary Voltage
22 kV, 33 kV	400/230 V


3. Rated frequency: 50 Hz


II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION																
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT																
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 3 of 20												
<p>1c.4 Core and windings</p> <p>The cores and windings of transformers shall be as follows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Transformer Rating (kVA)</th> <th rowspan="2">Construction of Core</th> <th rowspan="2">HV and LV Windings shall be made of</th> <th colspan="2">Construction of Windings</th> </tr> <tr> <th>HV winding</th> <th>LV winding</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50-2,000</td> <td>According to manufacturer's standard</td> <td>copper only</td> <td>According to manufacturer's standard</td> <td>According to manufacturer's standard</td> </tr> </tbody> </table>					Transformer Rating (kVA)	Construction of Core	HV and LV Windings shall be made of	Construction of Windings		HV winding	LV winding	50-2,000	According to manufacturer's standard	copper only	According to manufacturer's standard	According to manufacturer's standard
Transformer Rating (kVA)	Construction of Core	HV and LV Windings shall be made of	Construction of Windings													
			HV winding	LV winding												
50-2,000	According to manufacturer's standard	copper only	According to manufacturer's standard	According to manufacturer's standard												
<p>1c.5 Tappings</p> <p>The primary windings of transformers shall be provided with full capacity of externally-operated off-circuit tap changers.</p> <p>Tapping range: $\pm 2 \times 2.5\%$ of rated primary voltage</p> <p>The externally-operated off-circuit tap changer shall be designed for de-energized operation with the operating handle brought out through the cover of the tank. The operating handle shall have provision for locking and shall give visual indication of the tapping position without unlocking.</p> <p>The tap changer shall have a locking device to prevent improper use, the operating handle shall be rotated in clockwise direction from a high tap voltage to a lower tap voltage. The tap changer shall be provided with stops to identify the highest and lowest tap position. The tap changer positions shall be identified by the numbers in sequence. The number "1" shall be designated to the highest tap voltage. Consequently the number "5" indicates the lowest tap voltage. These identifications shall be in perfect correspondence to those indicated in the connection diagram on the nameplate. All five positions of the tap changer shall be operative positions.</p> <p>The tap positions shall be indelibly marked with weather-proof paint and in a colour which shall present distinctive contrast to the surrounding material.</p> <p>The operating handle of tap changer shall be made from non corrosion metal. <u>Plastic is not acceptable.</u></p> <p>1c.6 Connection symbol</p> <p>50 kVA to 160 kVA transformers shall have connection symbol either Dyn 11 or Yzn 11, see "C3 Schedule of detailed requirement".</p> <p>The transformers having connection symbol Yzn11 shall have full insulation level at neutral point of primary winding.</p> <p>250 kVA to 2,000 kVA transformers shall have connection symbol Dyn 11.</p>																
II																

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION																																																																										
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT																																																																										
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 4 of 20																																																																						
<p>1c.7 Losses and short - circuit impedance</p> <p>The specified or guaranteed losses <u>plus positive tolerance</u>, for each transformer unit, shall not be more than the figures in the table below.</p> <p>Short-circuit impedance shall be measured on the principle tapping of 22 or 33 kV at 75°C.</p> <p>Short-circuit impedance of the offered transformers shall be as specified in the table below and have tolerance according to the relevant standard.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Transformer Rating (kVA)</th> <th colspan="3">Watt Loss (W)</th> <th rowspan="3">Short-circuit Impedance at 75°C (%)</th> </tr> <tr> <th colspan="2">No-load loss, for system voltage of :</th> <th rowspan="2">Load loss at 75°C</th> </tr> <tr> <th>22 kV</th> <th>33 kV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>50</td><td>160</td><td>170</td><td>950</td><td>4</td></tr> <tr><td>100</td><td>250</td><td>260</td><td>1,550</td><td>4</td></tr> <tr><td>160</td><td>360</td><td>370</td><td>2,100</td><td>4</td></tr> <tr><td>250</td><td>500</td><td>520</td><td>2,950</td><td>4</td></tr> <tr><td>315</td><td>600</td><td>630</td><td>3,500</td><td>4</td></tr> <tr><td>400</td><td>720</td><td>750</td><td>4,150</td><td>4</td></tr> <tr><td>500</td><td>860</td><td>900</td><td>4,950</td><td>6.5 or more</td></tr> <tr><td>630</td><td>1,010</td><td>1,050</td><td>5,850</td><td>4</td></tr> <tr><td>1,000</td><td>1,270</td><td>1,300</td><td>12,150</td><td>6</td></tr> <tr><td>1,250</td><td>1,500</td><td>1,530</td><td>14,750</td><td>6</td></tr> <tr><td>1,500</td><td>1,820</td><td>1,850</td><td>17,850</td><td>6</td></tr> <tr><td>2,000</td><td>2,110</td><td>2,140</td><td>21,600</td><td>6</td></tr> </tbody> </table>					Transformer Rating (kVA)	Watt Loss (W)			Short-circuit Impedance at 75°C (%)	No-load loss, for system voltage of :		Load loss at 75°C	22 kV	33 kV	50	160	170	950	4	100	250	260	1,550	4	160	360	370	2,100	4	250	500	520	2,950	4	315	600	630	3,500	4	400	720	750	4,150	4	500	860	900	4,950	6.5 or more	630	1,010	1,050	5,850	4	1,000	1,270	1,300	12,150	6	1,250	1,500	1,530	14,750	6	1,500	1,820	1,850	17,850	6	2,000	2,110	2,140	21,600	6
Transformer Rating (kVA)	Watt Loss (W)			Short-circuit Impedance at 75°C (%)																																																																						
	No-load loss, for system voltage of :		Load loss at 75°C																																																																							
	22 kV	33 kV																																																																								
50	160	170	950	4																																																																						
100	250	260	1,550	4																																																																						
160	360	370	2,100	4																																																																						
250	500	520	2,950	4																																																																						
315	600	630	3,500	4																																																																						
400	720	750	4,150	4																																																																						
500	860	900	4,950	6.5 or more																																																																						
630	1,010	1,050	5,850	4																																																																						
1,000	1,270	1,300	12,150	6																																																																						
1,250	1,500	1,530	14,750	6																																																																						
1,500	1,820	1,850	17,850	6																																																																						
2,000	2,110	2,140	21,600	6																																																																						
<p>1c.8 Limits of temperature-rise, above 40°C ambient temperature</p> <p>Of top oil : not exceeding 60 K</p> <p>Of winding : not exceeding 65 K</p>																																																																										
<p>1c.9 Insulation level</p> <p>The insulation level of HV windings, LV windings and connected parts of transformers shall be as follows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nominal System Voltage (kV, r.m.s.)</th> <th colspan="2">Insulation Level</th> </tr> <tr> <th>Impulse Test Voltage Full-wave (kV, peak)</th> <th>Power Frequency Test Voltage, 1-min (kV, r.m.s.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>22</td><td>125</td><td>50</td></tr> <tr><td>33</td><td>170</td><td>70</td></tr> <tr><td>0.4/0.23</td><td>-</td><td>3</td></tr> </tbody> </table>					Nominal System Voltage (kV, r.m.s.)	Insulation Level		Impulse Test Voltage Full-wave (kV, peak)	Power Frequency Test Voltage, 1-min (kV, r.m.s.)	22	125	50	33	170	70	0.4/0.23	-	3																																																								
Nominal System Voltage (kV, r.m.s.)	Insulation Level																																																																									
	Impulse Test Voltage Full-wave (kV, peak)	Power Frequency Test Voltage, 1-min (kV, r.m.s.)																																																																								
22	125	50																																																																								
33	170	70																																																																								
0.4/0.23	-	3																																																																								


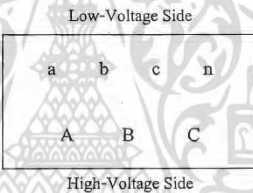
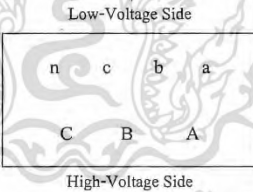
 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION																		
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT																		
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 5 of 20														
<p>1c.10 Bushings</p> <p>1. Number and location</p> <p>Each transformer shall have three (3) high-voltage bushings and four (4) low-voltage bushings located on the cover of the tank.</p> <p>Secondary neutral point of transformer shall be brought out by separate-insulated bushing(s) and loaded with rated current.</p> <p>2. Material</p> <p>Transformer bushings shall be made of good commercial-grade wet-process porcelain.</p> <p>The entire porcelain surface of the bushings that will be exposed after assembly shall be glazed.</p> <p>The colour of the glaze shall be brown.</p> <p>3. Electrical characteristics</p> <p>Transformer bushings shall be capable of withstanding the impulse and low-frequency voltage according to Table 5 of TIS 384.</p> <p>1c.11 Terminal connectors</p> <p>HV bushings shall be equipped with solderless clamp type connectors for aluminium conductor diameter range from 7.5 mm to 12.6 mm (sizes 35-95 mm²).</p> <p>Only for 50 kVA to 1,250 kVA transformers: LV bushings shall be equipped with terminal pad connectors (stud type connectors are preferable), of high conductivity bronze and hot-tin dipped. The terminal pads shall be drilled in accordance with NEMA Standards (9/16" holes on 1 3/4" centers); each hole shall be furnished with one (1) bolt M 12 x 60 mm (of at least 50 mm thread length), one (1) nut, two (2) flat washers, and one (1) lock washer; details of terminal pads shall be according to Drawing No. SA4-015/47002. The connectors shall be provided with mounting hardware (bolts, nuts, washers, and lock washers) of stainless steel or better.</p> <p>Only for 1,500 kVA to 2,000 kVA transformers: LV bushings shall be equipped with solderless clamp type connectors (stud type connectors are preferable), of high conductivity bronze and hot-tin dipped, for aluminium and copper conductor sizes, and number of circuits take off shall be as follows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Transformer Rating (kVA)</th> <th colspan="2">Applicable to Aluminium and Copper Conductors</th> <th rowspan="2">Number of Circuits</th> </tr> <tr> <th>diameter range (mm)</th> <th>sizes (mm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,500</td> <td>18.4 - 29.2</td> <td>240 - 500</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>2,000</td> <td>18.4 - 29.2</td> <td>240 - 500</td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table> <p>The connectors shall be provided with mounting hardware (bolts, nuts, washers, and lock washers) of stainless steel or better. The details of connectors shall be according to Drawing No. SA4-015/47002.</p>					Transformer Rating (kVA)	Applicable to Aluminium and Copper Conductors		Number of Circuits	diameter range (mm)	sizes (mm ²)	1,500	18.4 - 29.2	240 - 500	4	2,000	18.4 - 29.2	240 - 500	6
Transformer Rating (kVA)	Applicable to Aluminium and Copper Conductors		Number of Circuits															
	diameter range (mm)	sizes (mm ²)																
1,500	18.4 - 29.2	240 - 500	4															
2,000	18.4 - 29.2	240 - 500	6															
II																		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 6 of 20
<p>1c.12 Tank and Tank finish</p> <p>Tank and cover shall be constructed of welded steel plate suitable reinforced. The joints between the tank and cover shall be provided with suitable flanges properly bolted together with gaskets.</p> <p>Gaskets between metal surfaces shall be set in grooves or held in position by retainers so arranged that all parts are bolted metal-to-metal. The gaskets shall be made of resilient material which will not deteriorate under the action of hot oil and will remain oil-tight. Gaskets of such material which can be easily damaged by overpressing are not acceptable.</p> <p>The transformer tank shall be finished with mounting bracket for surge arrester (Surge arrester polymer housing type supplied by PEA) and shall be furnished with three (3) earthing terminal provided for ground leads of surge arrester, see Drawing No. SA4-015/50008.</p> <p>Interior surface shall be finished with oil resistant paint.</p> <p>Exterior surface shall be painted with a primer coat and not less than two (2) finish weather-resistant coats of grey color (RAL 7036).</p> <p>1c.13 Marking</p> <p>PEA's code number and word "SHORT CIRCUIT WITHSTAND" shall be painted, in orange, on the transformer tank (for transformer having no conservator) or on the conservator tank (for transformer having conservator) at the position that enables a clear observation, and also be legibly and durably inscribed on the metal part of nameplate. The code number and dimensions of each letter to be marked shall be given by PEA after the final of bid consideration.</p> <p>1c.14 Accessories</p> <p>The 50 kVA to 2,000 kVA transformers shall be furnished and equipped with the following accessories:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. HV and LV bushings, with terminal connectors 2. Bird guard cap (bushing cover), ultra-violet and track resistant material, e.g. polypropylene, neoprene, etc; which is suitable for exposure to sunlight 3. Earthing terminal for surge arrester, with solderless clamp type connector suitable for flexible copper insulated ground lead size 16 mm², 430 mm long. (See Drawing No. SA4-015/50008) 4. Tap changer 5. Thermometer pocket 6. Nameplate with connection diagram 7. Oil drain valve with plug or cap, installed at the lower part of the tank 8. Sludge drain plug, installed at the bottom of the tank 9. Earthing terminal, with solderless clamp type connector suitable for steel stranded conductor diameter of 9.0 mm (size 50 mm²); complete with lockwasher of stainless steel or better. 				
II				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 7 of 20
<p>10. Lifting lugs</p> <p>11. Lifting eyes on the cover</p> <p>12. Oil level gauge</p> <p>13. Compression type cable lug, for aluminium conductor diameter of 7.5-9.0 mm (sizes 35-50 mm²), suitable for connecting between HV bushing and surge arrester lead conductor.</p> <p>14. <u>Only for 50 kVA to 250 kVA transformers:</u> Pressure relief valve on the tank cover, oil filling plug on the tank cover, and supporting lugs for hanging the transformer tank to pole by using two (2) M 16 machine bolts.</p> <p>The lugs shall have 600 mm spacing; 500 mm or 400 mm spacing may be used when tank height will not permit the 600 mm dimension. (See Drawing No. SA4-015/50008)</p> <p><u>Only for 315 to 500 kVA transformers:</u> Pressure relief valve on the tank cover, and oil filling plug on the tank cover.</p> <p><u>Only for 630 kVA to 2,000 kVA transformers:</u> Pressure relief valve on the tank cover, oil conservator with dehydrating breather and oil level gauge. The cylinder of dehydrating breather shall be of transparent glass. The dehydrating breather shall be easy replaced and filled with silica-gel not less than 1.0 kg.</p> <p>15. <u>Only for 315 kVA to 2,000 kVA transformers:</u> Transport rollers</p> <p>16. <u>Only for 1,000 kVA to 2,000 kVA transformers:</u></p> <p>(a) Dial type thermometer with adjustable contact(s)</p> <p>(b) Double float Buchholz relay having two (2) contacts (for alarm and tripping)</p> <p>17. Other necessary accessories according to manufacturer's design.</p> <p>1c.15 Initial oil filling</p> <p>The transformers shall be supplied with initial oil filling. The oil shall be according to IEC 60296, high-quality, clean and dry.</p> <p>The oil shall be free from Polychlorinated biphenyls (PCB).</p> <p>1c.16 Nameplate</p> <p>The following minimum nameplate information shall be legibly and durably inscribed on the metal part of nameplate:</p> <p>(1) Manufacturer's name</p> <p>(2) Manufacturer's serial number</p> <p>(3) Year of manufacture</p> <p>(4) PEA's code number</p> <p>(5) Contract number</p> <p>(6) Number of phases</p> <p>(7) Rated frequency in Hz</p>				

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 8 of 20
<p>(8) Rated power in kVA (9) Rated voltage in V (10) Rated current in A (11) Rated secondary short-circuit withstand current in kA r.m.s. (12) Tapping voltages in V (13) Connection symbol (14) Short-circuit impedance in % (15) Connection diagram (16) Type of cooling (17) Oil quantity in liters (18) Total mass in kg (19) Wording "SHORT CIRCUIT WITHSTAND"</p> <p>1c.17 Bushing location and Mark terminal Bushing shall locate as shown in the Figures below:</p> <div style="text-align: center;">  <p>Low-Voltage Side</p> <p>a b c n</p> <p>A B C</p> <p>High-Voltage Side</p> <p>Figure 1: 50-250 kVA Tank top view</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Low-Voltage Side</p> <p>n c b a</p> <p>C B A</p> <p>High-Voltage Side</p> <p>Figure 2: 315 -2,000 kVA Tank top view</p> </div> <p>The letters A, B, C, a, b, c, and n, shall be durable marked on transformer tank beside bushings consequently; Mark by painting shall not be accepted.</p>				
II				


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 9 of 20
<p>1c.18 Mass</p> <p><u>For 50 kVA to 160 kVA transformers:</u> Mass of complete transformer with oil and accessories shall not be more than 1,000 kg.</p> <p><u>For 250 kVA transformers:</u> Mass of complete transformer with oil and accessories shall not be more than 1,200 kg.</p> <p>Tolerance of the mass of proposed complete transformers with oil shall be within ± 5 percent of the declared mass of transformer which passed type test given by the bidder in 2a Performance data and guarantee of three-phase transformer (Page 18 of 20) but the maximum mass shall not exceed the above allowable mass.</p> <p>1d Packing</p> <p>For transformers manufactured <u>outside</u> the territories of Thailand, each transformer shall be <u>seaworthy</u> packed in individual <u>export</u> crate or wooden case which will not be returned.</p> <p>For transformers manufactured <u>within</u> the territories of Thailand, each transformer shall be packed in individual crate or wooden case which will not be returned.</p> <p><u>Only for 50 kVA to 160 kVA transformers for 22 kV system and 50 kVA to 100 kVA transformers for 33 kV system,</u> each crate or wooden case shall be strong enough for stacking over with at least another one.</p> <p>If the crate or wooden case is made of rubber wood (Yang-para), the wooden parts shall be treated with wood preservative.</p> <p>The details of wood treatment shall be described.</p> <p>1e Tests and test reports</p> <p>1e.1 Routine test</p> <p>Each transformer shall pass the manufacturer's standard routine tests, and also pass the following tests in accordance with the relevant standards:</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) Measurement of winding resistance (2) Measurement of voltage ratio, and check of phase displacement (3) Measurement of short-circuit impedance (4) Measurement of load loss (5) Measurement of no-load loss (6) Induced overvoltage withstand test (7) Separate-source voltage-withstand test (8) Oil dielectric strength test 				
II				



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 10 of 20
<p>1e.2 Type test</p> <p>The following type tests shall be in accordance with the relevant standards:</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) Temperature-rise test (2) Impulse withstand voltage test <p>Type test shall be made on only one (1) unit of each rating.</p> <p>The transformers shall be passed all items of the type tests, conducted by the acknowledged independent testing laboratories.</p> <p>The following independent testing laboratories are accepted by PEA:</p> <ul style="list-style-type: none"> - KEMA : KEMA Laboratories (Holland) - V' Fall : Statens Vattenfallsverk, The Swedish State Power Board (SWEDEN) - CRIEPI : Central Research Institute of Electric Power Industry (JAPAN) - EdF : Electricite de France (FRANCE) - CESI : Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (ITALY) - PLI : Powertech High Power Laboratory (CANADA) - TCA : Testing and Certification (AUSTRALIA) - OHT : Ontario Hydro Technologies (CANADA) - EGAT : The Electricity Generating Authority of Thailand (THAILAND) - : Testing Laboratory, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University (THAILAND) - SATS : Scandinavian Association for Testing Electric Power Equipment (NORWAY) - ASTA : ASTA Certification Services (UK) <p>The bidder are at liberty to quote the transformers which are tested at the other independent testing laboratories not mentioned above, but have to be subjected to approval of PEA before the tests are proceeded.</p> <p>PEA will also accept the transformers have been supplied to PEA and get the order from PEA's Procurement Department (From PEA's Head Office), without tests reports by laboratories mentioned above.</p> <p>The bidders have to submit the type test reports within fifteen (15) calendar days of the bid closing date. The Item offered without submitting the type test reports shall be rejected.</p> <p>The costs of all tests and test reports shall be borne by the Contractor.</p>				
II				


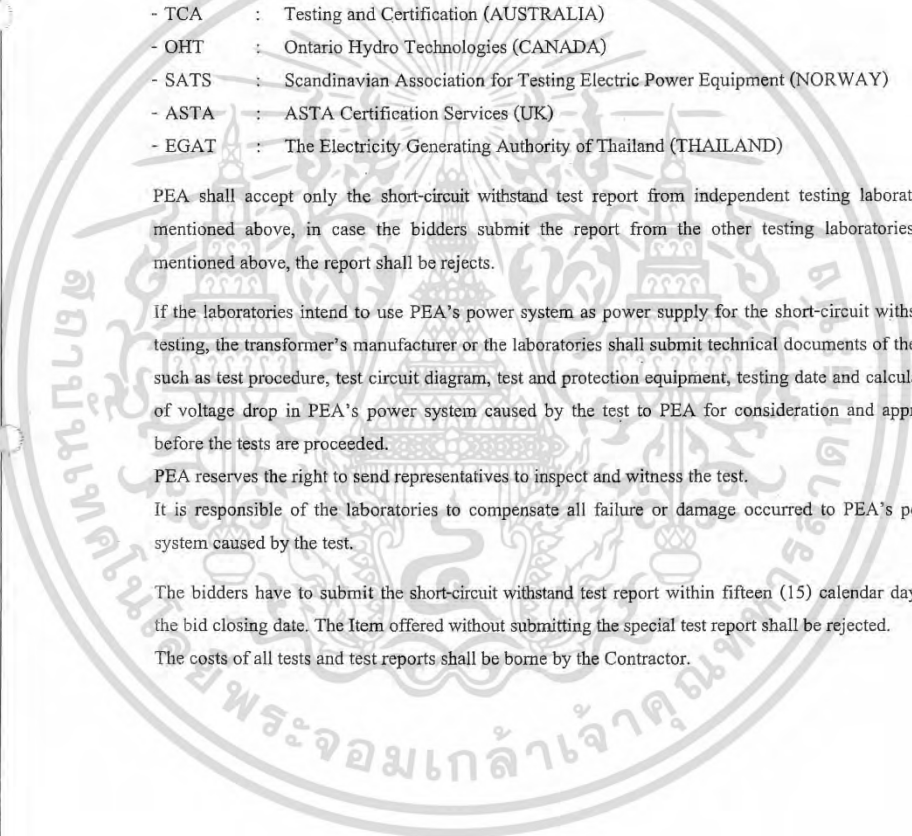
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY		PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION		
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 11 of 20
<p>1e.3 Special test</p> <p>Short-circuit withstand test</p> <p>The transformers shall be passed short-circuit withstand test in accordance with the latest IEC 60076-5.</p> <p>The transformer is considered similar to another transformer taken as a reference if it has the following characteristics in common with the latter:</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) Same type of operation, for example generator step-up unit, distribution, interconnection transformer and same rated voltage according to TABLE 1; (2) Same conceptual design, for example dry-type, oil-immersed type, core type with concentric windings, sandwich type, shell type, circular coils, non-circular coils; (3) Same arrangement and geometrical sequence of the main windings; (4) Same type of winding conductors, for example, aluminium, aluminium alloy, annealed or hardened copper, metal foil, wire, flat conductor, continuously transposed conductors and epoxy bonding, if used; (5) Same type of main windings for example, helical-, disc-, layer-type, pancake coils; (6) Absorbed power at short circuit (rated power/per unit short-circuit impedance) between 30% and 130% of that relating to the reference unit, see TABLE 2; (7) Axial forces and relative winding stresses (ratio of actual stress to critical stress) occurring at short circuit not exceeding 120% of those in the reference unit; (8) Same manufacturing processes; (9) Same clamping and winding support arrangement. <p>In case of the bidder does not prepare data in item (5) and (7) for PEA consideration, the bidder may submit the value of current density and ampere-turns of primary and secondary winding of the proposed transformers and the values shall not be more than the transformer of the submitted short-circuit withstand test report.</p> <p>In this case, the bidder shall submit the additional information of the proposed and tested transformers as shown in TABLE 3: Design data of the reference transformers and the proposed transformers and the necessary information in order to show that the special test report can prove the performance of the proposed transformers.</p>				
II				


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY		PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION												
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT														
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 12 of 20										
TABLE 1 Type of operation and rated voltage of the transformers similar to the reference transformer														
Type and Rated voltage		The reference transformer	The proposed transformers											
Type		3 Phase only	3 Phase											
Rated primary voltage		22 kV or 24 kV	22 kV											
Rated primary voltage		33 kV or 36 kV	33 kV											
Rated secondary voltage (3 phase)		400/230 V or 416/240 V	400/230 V											
TABLE 2 Rated power of the transformers similar to the reference transformer														
No.	Rated power (kVA) of the reference transformer	Rated power (kVA) of the proposed transformers												
		50	100	160	250	315	400	500 ⁽¹⁾	630	1,000	1,250	1,500	2,000	
1	100	50	100											
2	160	50	100	160										
3	250		100	160	250	315	500 ⁽¹⁾							
4	315		100	160	250	315	400	500 ⁽¹⁾						
5	400			160	250	315	400	500 ⁽¹⁾						
6	500 ⁽¹⁾		100	160	250	315	400	500 ⁽¹⁾						
7	630				250	315	400	500 ⁽¹⁾	630	1,000				
8	1,000				250	315	400	500 ⁽¹⁾	630	1,000	1,250			
9	1,250				250	315	400	500 ⁽¹⁾	630	1,000	1,250	1,500		
10	1,500					315	400	500 ⁽¹⁾	630	1,000	1,250	1,500		
11	2,000						400	500 ⁽¹⁾	630	1,000	1,250	1,500	2,000	
Note : ⁽¹⁾ : Based on 6.5 % short-circuit impedance, In case the bidder propose the transformers or the reference transformer having short-circuit impedance more than 6.5 %, the absorbed power at short circuit of the reference and the similar transformer shall be re-calculated and submitted to PEA for consideration.														
														
II														



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 13 of 20
<p>The transformers shall be passed the short-circuit withstand test according to IEC 60076-5 conducted or inspected by the acknowledged independent testing laboratories as follows:</p> <ul style="list-style-type: none"> - KEMA : KEMA Laboratories (Holland) - V' Fall : Statens Vattenfallsverk, The Swedish State Power Board (SWEDEN) - CRIEPI : Central Research Institute of Electric Power Industry (JAPAN) - EdF : Electricite de France (FRANCE) - CESI : Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (ITALY) - PLI : Powertech High Power Laboratory (CANADA) - TCA : Testing and Certification (AUSTRALIA) - OHT : Ontario Hydro Technologies (CANADA) - SATS : Scandinavian Association for Testing Electric Power Equipment (NORWAY) - ASTA : ASTA Certification Services (UK) - EGAT : The Electricity Generating Authority of Thailand (THAILAND) <p>PEA shall accept only the short-circuit withstand test report from independent testing laboratories mentioned above, in case the bidders submit the report from the other testing laboratories not mentioned above, the report shall be rejects.</p> <p>If the laboratories intend to use PEA's power system as power supply for the short-circuit withstand testing, the transformer's manufacturer or the laboratories shall submit technical documents of the test such as test procedure, test circuit diagram, test and protection equipment, testing date and calculation of voltage drop in PEA's power system caused by the test to PEA for consideration and approval before the tests are proceeded.</p> <p>PEA reserves the right to send representatives to inspect and witness the test.</p> <p>It is responsible of the laboratories to compensate all failure or damage occurred to PEA's power system caused by the test.</p> <p>The bidders have to submit the short-circuit withstand test report within fifteen (15) calendar days of the bid closing date. The Item offered without submitting the special test report shall be rejected.</p> <p>The costs of all tests and test reports shall be borne by the Contractor.</p>				
				
II				


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 14 of 20
<p>C2 Material and packing data to be given by bidder The bidder has to submit the following data and details of transformers and accessories:</p> <p>2a Performance data and guarantee of the three-phase transformers. (Vide Pages 16 to 18 of 20)</p> <p>2b Drawing of overall transformer with dimensions in mm showing of particulars of normal construction details</p> <p>2c Drawings, with dimensions in mm, of the following accessories:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. HV and LV bushings 2. Terminal connectors, on HV and LV bushings, with description of materials used for the component parts 3. Nameplate with connection diagram 4. Valve, showing the internal construction 5. Earthing terminal connector 6. Dehydrating breather, and details of coupling 7. Bracket for surge arrester 8. Earthing terminal for surge arrester 9. Accessories according to manufacturer's design, if any <p>2d Catalogues and/or drawings with details of the following accessories:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Dial type thermometer 2. Double float Buchholz relay 3. Pressure-relief valve 4. Pressure-relief vent (explosion vent) with bursting plate <p>2e Specifications of transformer oil and test report</p> <p>2f List of routine test</p> <p>2g Type test report</p> <p>2h Short-circuit test report</p> <p>2i Others necessary information in order to show that the special test report can prove the performance of the proposed transformers.</p> <p>2j Bidder shall propose and quote for recommended spare part list with separate price for each offered item (e.g., bushings)</p>				
II				


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY		
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค <small>PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY</small>		TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION		
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 15 of 20
<p>2k Packing details</p> <p>Packing method (shown by drawing(s), and describe packing materials)</p> <p>Number of transformers in one (1) crate or wooden case (one)</p> <p>Overall dimensions (L x W x H) of each crate or wooden case in cm</p> <p>Volume of each crate or wooden case in m³</p> <p>Gross weight of each crate or wooden case in kg</p> <p>Number of crates or wooden cases</p>				
				
II				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 16 of 20
Invitation to Bid No.:				
2a Performance data and guarantee of three-phase transformers				
				Item
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 / Yzn11		
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		%		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 17 of 20
Item				
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 No. SA4-015/47002	Yes/No			
Winding			HV	LV
Manufacturer's name (the bidders have to quote not more than three (3) manufacturers)	-			
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	-			
Core				
Manufacturer's name (the bidders have to quote not more than three (3) manufacturers)	-			
Country of origin	-			


II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION	
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT	
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559
Rev. No. : 3	Form No. 02-3S
Page 18 of 20	
Item	
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
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	
Height	mm
Width	mm
Depth	mm
Dimensions of transformer	
Overall height	mm
Overall width	mm
Overall depth	mm
Height over cover	mm
Detail documents of Item 1 on Page 20 of 20 shall be sent to PEA before shipment/delivery	Yes/No
Other :	


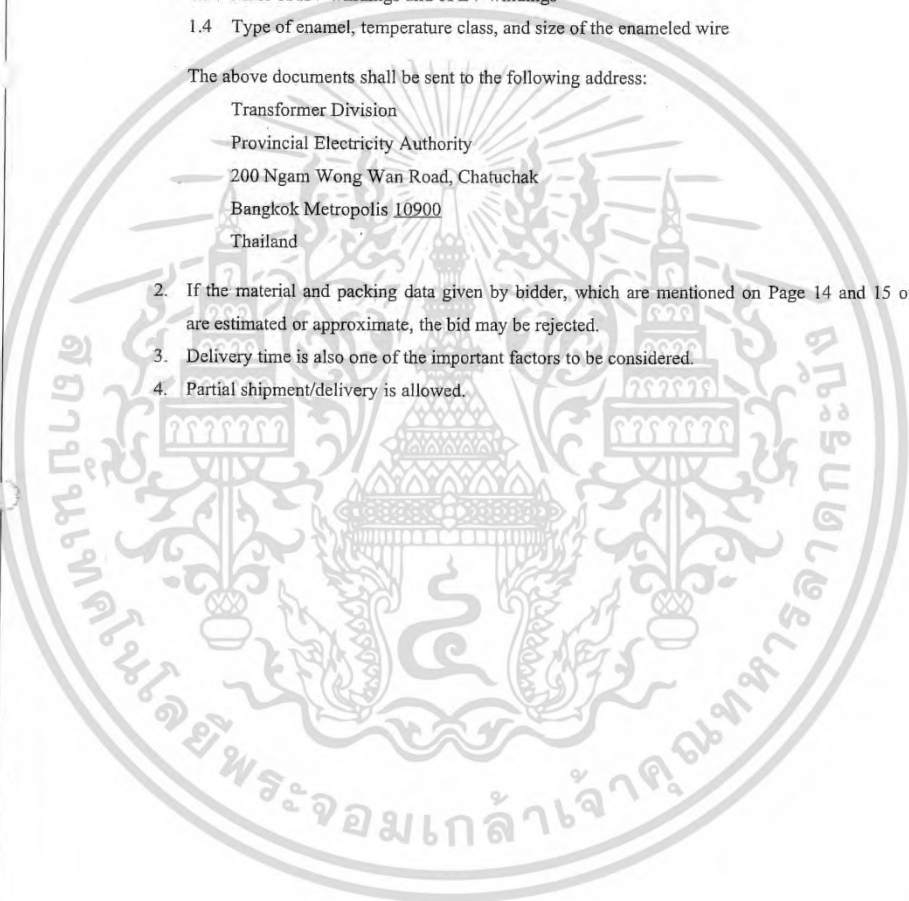
II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 19 of 20
TABLE 3 Design data of the reference transformers and the proposed transformers				
Description	Design value of the reference transformers	Design value of the proposed transformers		
Rating (kVA)				
% Short circuit impedance				
Construction of Core				
HV Windings, made of				
LV Windings, made of				
Construction of HV Windings				
Construction of LV Windings				
HV Current density				
LV Current density				
Ratio of actual stress to critical stress				
Same arrangement of main windings and geometrical sequence as the reference unit (Yes/No)				
Same clamping and supporting arrangement. (Yes/No)				

II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY TECHNICAL SPECIFICATION DIVISION				
THREE-PHASE TRANSFORMERS FOR 22 kV AND 33 kV 50 Hz DISTRIBUTION SYSTEMS WITH ABILITY TO WITHSTAND SHORT CIRCUIT				
Specification No. RTRN-035/2558	Approved date : 4/02/2559	Rev. No. : 3	Form No. 02-3S	Page 20 of 20
<p>Note: Conditions for documentation and consideration</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. The Contractor has to supply the following documents in <u>English and/or Thai</u>, before shipment/delivery, for each ordered transformer: <ol style="list-style-type: none"> 1.1 Report of routine tests , report of type tests and report of special test 1.2 Number of turns of each winding, each coil, and each tapping position 1.3 Mass of HV windings and of LV windings 1.4 Type of enamel, temperature class, and size of the enameled wire <p>The above documents shall be sent to the following address:</p> <p style="padding-left: 40px;">Transformer Division Provincial Electricity Authority 200 Ngam Wong Wan Road, Chatuchak Bangkok Metropolis 10900 Thailand</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. If the material and packing data given by bidder, which are mentioned on Page 14 and 15 of 20 are estimated or approximate, the bid may be rejected. 3. Delivery time is also one of the important factors to be considered. 4. Partial shipment/delivery is allowed. 				
				
II				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Intelligent Networks and Systems Society

Acceptance Letter

International Journal of Intelligent Engineering and Systems (IJES)

Dear Chai Chompoonwai,

Manuscript Title:

Analysis of Winding Temperature and Design of Distribution Transformer for Improving Short Circuit Withstand Capability under Renewable Generations Mixed Environment

Author(s): Boonlert Suechoey, Jongrak Boonseng, Chow Chompoonwai, Chai Chompoonwai

Thank you for submitting your paper to the International Journal of Intelligent Engineering and Systems (IJES). Based on double blind review process, we are pleased to inform you that our Review Committee has accepted your paper.

The paper will be included in the IJES, which will be published with ISSN (ISSN: 2185-3118) in online on the website (<http://www.inass.org/publications.html>).

We are looking forward to your further contribution to our journal.

Kind regards

Prof. Dr. Kei EGUCHI

Editor-in-Chief, International Journal of Intelligent Engineering and Systems

Department of Information Electronics

Fukuoka Institute of Technology

E-mail: ijies@inass.org

Kei Eguchi
江口 啓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Analysis of Winding Temperature and Design of Distribution Transformer for Improving Short Circuit Withstand Capability under Renewable Generations Mixed Environment

Boonlert Suechoey¹ Chongrak Boonseng¹ Chow Chompoonwai¹ Chai Chompoo-inwai^{1*}

¹Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
 * Corresponding author's Email: chaichompoo@gmail.com

Abstract: Under renewable generations mixed in today's modern grid system, many of renewable generation resources tend to increase the fault level to an existing power system. Rules and regulation for power equipment and devices need to be revised and updated, of course, no exception for the distribution transformers. This article, therefore, presents the evaluation and analysis of the winding temperature on both loading and short circuit conditions of an oil-immersed distribution transformer and propose the novel transformer design method for improving short circuit withstand capability. In the study, the methodologies of measuring and estimating the winding temperature of the transformer during short circuited are presented and implemented. In the study, various winding parameters are analysed including: the winding temperature, the hottest temperature of the winding after a short circuit, the short circuit current, short circuit force and short circuit duration. The tested and analysed result are benefit for the newly proposed distribution transformer design of a 400 kVA 3 phases 50 Hz 22 kV-400/230 V, Dyn11. The new design approaches will enable designers to find a weak spot and proper selection of raw materials, such as winding size, insulation thickness and properties of the silicon steel for a better quality of distribution transformer. Moreover, the new design can offer lower winding temperature rise of transformer while loading or experiencing with short circuit conditions meaning that it can prolong transformer insulation and extend transformer lifetime.

Keywords: Hottest spot temperature, Temperature rise, Short circuit current, Short circuit force.

1. Introduction

Distribution transformer (DT) is an important device in electrical power system. It is not just only the front end equipment to deliver electricity to end consumers but also plays an important role as a system healthy monitoring and indicator. At the present time, under the new environment of renewable generation mixed in smart grid system, an integration of renewable generation resources tend to increase the fault level and cause severe operation issues to an existing power system [1]. The variety of new converter technology in generations and load complexity can also cause power quality issues to a conventional power system. Therefore, the new safety design rules and regulations need to be

revised and updated to power equipment, apparatus and devices including both power transformers and distribution transformers. Many articles have been studied about the hot-spot inside distribution transformer and its windings because this is an important factor indicate transformer efficiency, performance and lifetime. In 2008, methodologies of finding transformer winding hot spot while loading was proposed and implemented by [2], and [3] has investigated and compare the algorithm of the hot-spot temperature calculation to an experimental test of power transformer in 2015. While [4] used support vector regression to analyse and compared three of transformer top oil temperature modelling, [5] has analysed and compare the hot-spot thermal models of HV/LV prefabricated Oil-Immersed

Received: May 10, 2018

12

transformers by using top-oil temperature rise models. In addition, [6] described the application of finite element methods for determining the distribution of losses over windings and determining the value of the hot-spot factor and hot-spot temperature. Researchers in [7] and [8] revealed that external short circuit can produce high current in transformer winding and create high internal forces which are the major cause of damaging transformer. Moreover, [9] has found the impact of transformer's losses from harmonics which can deteriorate transformer lifetime. Hence, it can be seen that many researches aimed focus to transformer's lifetime analysis and study. Researchers in [10] have proposed an assessment on aging model of IEEE/IEC standards for Oil-Immersed transformer by using thermal model to analyse the behaviour transient thermal performance while [11] has defined the smart meter functions required to accurately assess the aging of distribution transformer according to IEEE Std. C57.91 and C57.110. Although many articles have been studied and focus on distribution transformer hot-spot temperature and lifetime, however, no one has been considering the design of DT which includes features to withstand the loading and short circuit conditions among the integration of various renewable generations mixed.

Therefore, this research is not only present new design methods of distribution transformer but also implement the testing, evaluating, and analysing the winding temperature on various loading and short circuit conditions of an oil-immersed distribution transformer. Then, based on analysis results, this research proposes new techniques for improvement and development of distribution transformers design for power system security enhancement and extend transformer's lifetime.

2. Method of analysis

Typically, the winding insulation aging depends on the thermal inside the transformer and operating time. The degraded insulation usually occurs at the hottest spot temperature. Therefore, in this study, main focuses aimed to these followings:

2.1 Specific parameter from a transformer temperature rise test

In Thailand, the Provincial Electricity Authority of Thailand (PEA) [12], who responses for almost 90% of distribution system in the country, has issued the regulation and limitation of distribution transformer parameters within specific range. Details of each parameter are shown in following

equations:

2.1.1. Average winding temperature rise [13-15]

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

$$\Theta_{w2} = \frac{Rt_2}{Rt_1} (k + \Theta_{w1}) - k \quad (2)$$

Where;

Θ_{wr} is average winding rise, °C

Θ_a is ambient temperature, °C

Θ_{w1} is initial average winding resistance, °C

Θ_{w2} is average winding resistance at shutdown, °C

Rt_1 is winding resistance at ambient temperature, Ω

Rt_2 is winding resistance after switch off (graphical extrapolation), Ω

$k = 234.5$ for copper, 224.5 for aluminum

2.1.2. Top oil temperature rise at rated load

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

Where;

Θ_{or} is top oil temperature rise at rated load, °C

Θ_o is top oil temperature at rated load, °C

2.2 Parameter from transformer short-circuit

During short circuit condition, following critical parameter need to be calculated [16]

$$t = \frac{1250}{I^2} I \quad (4)$$

Where;

t is short-circuit current duration, in second

$I = I_{sc}/I_R$ is symmetrical short-circuit current, in multiples of normal base current

Remark: less than 500 kVA. However, for the larger transformer, the duration of the short circuit should not exceed 2 seconds by default.

2.2.1. Short-circuit current calculation [13, 16]

The short circuit current calculation can be calculated as following equations.

1. Symmetrical current can be found from the equation.

$$I_{sc} = \frac{I_R}{Z_T + Z_S} \quad (5)$$

Received: May 10, 2018

13

Where;

I_k is rated current, in rms amperes
 Z_T is transformer impedance, in per unit
 Z_S is impedance of the system, in per unit

Remark: This research addresses short circuit current at the terminals of the transformer without change on impedance of the system. (Therefore, Short circuit current is the maximum)

2. Asymmetrical current can be found from the equation.

$$I_{SC(pkasym)} = KI_{SC} \quad (6)$$

Where;

$$K = [1 + (e^{-(\theta + \pi/2)r/x}) \sin \theta] \sqrt{2}$$

and

e is base of natural logarithm
 θ is arctan x/r , in radian
 x/r is ratio of effective alternating-current reactance to resistance, both in ohms

3. Calculation of winding temperature during a short circuit

Typically, final winding temperature value (T_f) at the end of short circuit duration can be calculated from Eq. (7).

$$T_f = (T_k + T_S) \cdot m(I + E + 0.6m) + T_S \quad (7)$$

Where;

$$m = \frac{(W_s) t}{C(T_k + T_S)}$$

In Eq. (7), the recommend value of m should be restricted to $m = 0.6$ or less. However, for if value of m exceeds than 0.6, T_f can be found from Eq. (8).

$$T_f = (T_k + T_S) [\sqrt{e^{2m} + E(e^{2m} - 1)} - 1] + T_S \quad (8)$$

Where;

T_k is 234.5 for copper, 224.5 for aluminum.
 T_S is Initial temperature. It is equal to following conditions:

(1) 30 °C ambient temperature plus the average winding rise plus the manufacturer's recommended hottest spot allowance; or

(2) 30 °C ambient temperature plus the limiting winding hottest spot temperature rise specified for the appropriate type of transformer.

Where;

 e is base of natural logarithm ≈ 2.718

E is per unit eddy current loss, based on resistance loss (W_s), at starting temperature

$$E = E_r \left[\frac{T_k + T_r}{T_k + T_S} \right]^2 \quad (9)$$

Where;

E_r is per-unit eddy current loss at reference temperature

T_r is reference temperature: 20°C ambient temperature plus rated average winding rise

W_s is short-circuit resistance loss of winding at the starting temperature, in watts per pound of conductor

$$W_s = \frac{W_r N^2}{M} \left(\frac{T_k + T_S}{T_k + T_r} \right) \quad (10)$$

Where;

W_r is resistance loss of winding at rated current and reference temperature, in watt

N is symmetrical short circuit magnitude, in times normal rated current

M is weight of winding conductor, in pounds

C is average thermal capacitance per pound of conductor and its associated turn insulation, in watt-seconds per degree Celsius. It shall be determined by iteration from either of the following empirical equation:

For copper

$$C = 174 + 0.0225(T_S + T_f) + 110 \left(\frac{A_i}{A_c} \right) \quad (11)$$

For aluminum

$$C = 405 + 0.1(T_S + T_f) + 360 \left(\frac{A_i}{A_c} \right) \quad (12)$$

Where;

A_i is cross-sectional area of turn insulation

A_c is cross-sectional area of conductor

2.3 Short-circuit force calculation according to IEC 76-5 standard [17]

2.3.1. Asymmetrical short circuit current

The asymmetrical short circuit current will be calculated as follows:

Received: May 10, 2018

14

$$I_{SC} = \sqrt{2} \times [1 + e^{\frac{-\pi R}{X}}] \times \left(\frac{I_{ph}}{Ez}\right) \quad (13)$$

Where;

 I_{ph} is Rated phase current R is % Resistance X is % Reactance Ez is Per unit impedance

2.3.2. Calculation of radial forces

Axial leakage flux interacts with coil current generating radial force (F_{rad}). Radial flux component interacts with coil current generating axial force (F_{ax}). Both forces directly damage transformer coils. In normal operation, the forces are minimal, but if the transformer experiences short circuit conditions, current and magnetic force will become very high. Thus, short circuit current must be considered when designing a transformer. The radial force can be obtained from Eq. (14)

$$F_{rad} = 0.628 \times \left[\frac{(N \times I)^2}{H_w} \right] \times \pi \times D_m \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (14)$$

Where;

 D_m is mean diameter of the pair of windings, mm. H_w is geometrical average length of windings, mm. N is number of winding electrical turns, mm. I is rms value of winding current, A $r = l/Ez$ is overcurrent factor $k = [1 + e^{\frac{-\pi R}{X}}]$ is peak amplitude factor

2.3.3. Calculation of axial forces

The value of axial force at short circuit withstand test can be calculated by Eq. (15)

$$F_{ax} = 0.628 \times \left[\frac{(N \times I)^2}{H^2 W} \right] \times \pi \times D_m \times \left[d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right] \times (2K - 1) \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (15)$$

Where;

 d is width of the main duct a_1, a_2 are radial width of winding

The value of hoop stress at short circuit withstand test can be calculated by Eq. (16)

$$\sigma_t = 0.314 \times \left[\frac{N \times I}{H_w} \right] \times D_m \times J \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (16)$$

Table 1. Maximum permissible values of average temperature of the winding after short circuit (θ_1)

Transformer Type	Insulation system temperature (°C)	Maximum values of θ_1	
		Copper	Aluminum
Oil-immersed	105 (A)	250 °C	200 °C

Remark: Refer to [14, 17, 19]

Where;

 σ is hoop stress, N/mm²

2.4 Calculation of the final winding temperature according to IEC standard

The highest average temperature θ_1 of the winding after short circuit can be calculated by Eq. (17)

For copper

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{J^2 t} - 1 \quad (17)$$

Where;

 θ_0 is the initial temperature, °C J is the short circuit current density, A/mm² t is the duration, seconds.

3. Transformer testing procedures and tested results

3.1 Test procedures and results

For better test results and accuracy, during the transformer temperature test, following procedures are carefully prepared and implemented [18, 20-21]:

1. The tested transformer is sealed type oil-immersed distribution transformer of 400 kVA 3ph 50Hz 22000-400/230V Dyn 11.

2. Figs. 1 and 2 show the tested circuit of transformer open circuit and short circuit test respectively. Then, Fig. 3 shows the installation of type K thermocouples at the different points of transformer windings.

3. In test procedures, the increasing voltage supply at high side until the total loss (no load + load loss) was constant at $610 + 3949.3 = 4559.3$ Watt, from open circuit and short circuit test.

It can be seen from Fig. 4 and Fig. 5 that both temperature on low voltage winding and high voltage winding tend to be constant after 12 hours of loading. Moreover, result clearly revealed that the winding temperature obtained from type K-

Received: May 10, 2018

15

thermocouple at the top positions give the higher temperature than the bottom or lower coil positions.

However, when compare the temperature of the top winding position (point 11 from Fig. 4 or point 10 from Fig. 5) and the top oil position (point 16 from Fig. 6), it can be found that top winding temperature is higher than top oil temperature for all 12 hours of testing. Therefore, in reality, power engineers usually use top oil temperature to represent and estimate the transformer winding temperature while loading conditions.

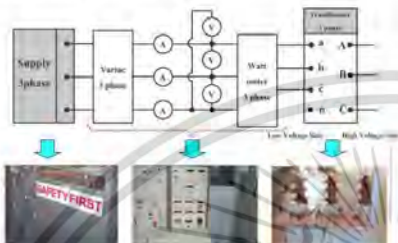


Figure.1 Open circuit test

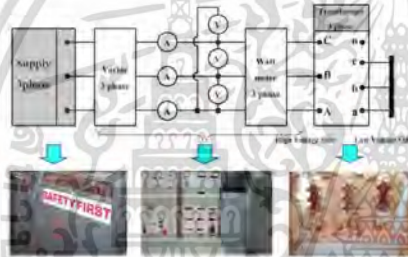


Figure.2 Short circuit test

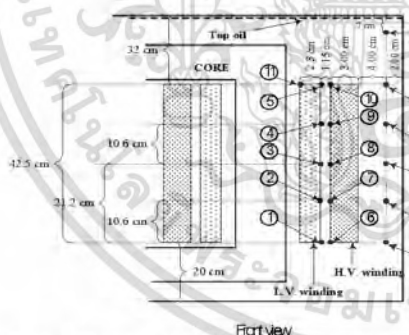


Figure.3 Thermocouple installation at different points of an oil-immersed distribution transformer [15, 18, 22]

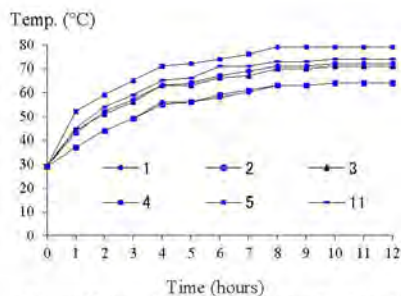


Figure.4 Low voltage temperature results at points 1,2,3,4,5 and 11

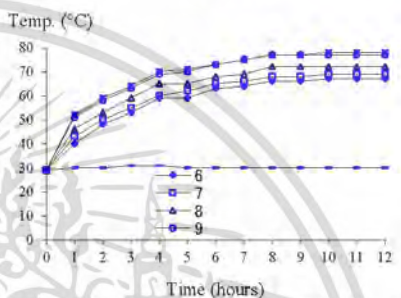


Figure.5 High voltage temperature results at points 6,7,8,9,10 and ambient temperature while testing

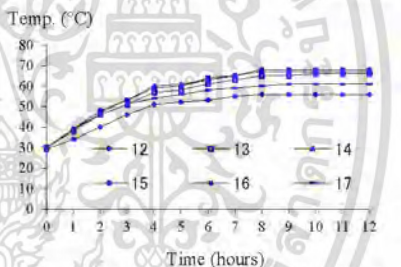


Figure 6 Oil temperature results at points 12-17

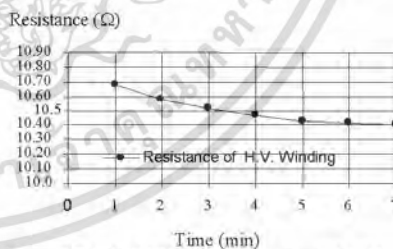


Figure.7 Result of HV-resistance after switch off load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Moreover, Fig. 7 and Fig. 8 show the winding resistance profiles in both high voltage coil (HV) and low voltage coil (LV) after disconnect load from transformer. The benefit of these two resistances profile will use for calculate the hottest spot of winding temperature.

3.2 Analysis result

From the test results, important variables and parameter are evaluated and calculated:

1. Θ_{wr} ([15, 18] give not more than 65 °C)
2. Top oil temp. (Θ_o)=73 °C (from [18] specific ≤ 105 °C)
3. Θ_{or} = 42 °C (from [15, 18] specific ≤ 60 °C)

The calculation of top oil temperature rise (point 17 of Fig. 3) can be found in Fig. 9 and it can be seen that this temperature is still meet the standard specified in [15].

3.3 Comparison between conductor hottest spot temperature from testing and calculation

The comparison between the hottest spot temperature of transformer winding both in low voltage side (LV) and high voltage side (HV) are shown in Figs. 10-11. It can be clearly seen that the hottest temperature obtained from the calculations are pretty closed to the one from the test procedures. Therefore, this finding is an advantage guideline for distribution transformer designer because the designer can use this technique and algorithm to estimate the hottest spot temperature instead of perform the real transformer test in the laboratory.

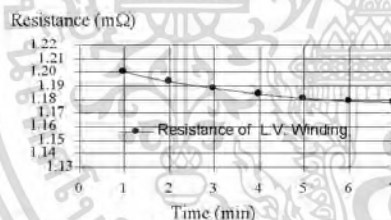


Figure 8 Result of LV-resistance after switch off load

Table 2. Technical data of tested transformer

Capacity(kVA)	400
High voltage(V)	22000
Low voltage(V)	400/230
No. of phase	3
Frequency(Hz)	50
Vector group	Dyn 11
Impedance(%)	4.0
Insulation Class	A
Cooling type	ONAN

Table 3. Calculation results of average winding temperature rise

Parameter	LV.winding	HV.winding
Θ_{w1} (°C)	31.00	31.00
R_{d1} (Ω)	0.00103	9.13
Θ_{w2} (°C)	78.80	76.70
R_{d2} (Ω)	0.00122	10.82
Θ_{wr} (°C)	47.80	45.70

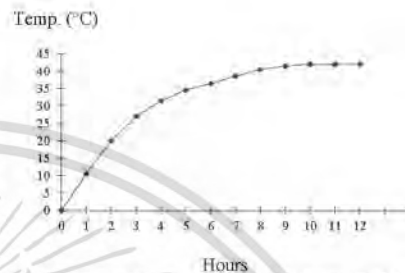


Figure 9 Top oil temp rise calculation (point 17 of Fig. 3) at rated load

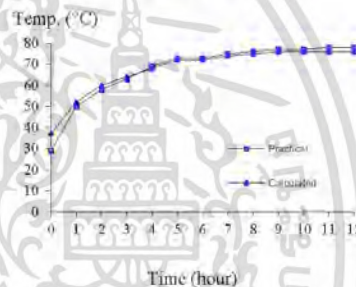


Figure 10 LV-conductor hottest spot temperature (Θ_h) comparison between testing and calculating at full load

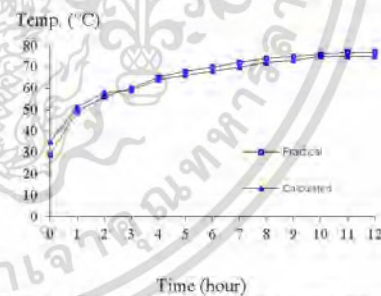


Figure 11 HV-conductor hottest spot temperature (Θ_h) comparison between testing and calculating at full load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Received: May 10, 2018

17

Remark:

1. In Figs. 10 and 11, the assumption for ambient temperature is 30 °C when calculated hottest spot temperature of conductor (Θ_h).
2. From [16, 18], (Θ_h) \leq 140 °C and (Θ_m) \leq 80 °C

3.4 Comparison of short circuit withstand parameter between traditional design and the newly proposed design

In this comparison, the traditional transformer design parameters [12] will be compared to the newly proposed design procedures of distribution transformer which already considering about improving short circuit capability. The newly proposed procedures in Fig. 12 will provide the new set of optimum designed parameters. One can find the numerical comparing result in Tables 4-8.

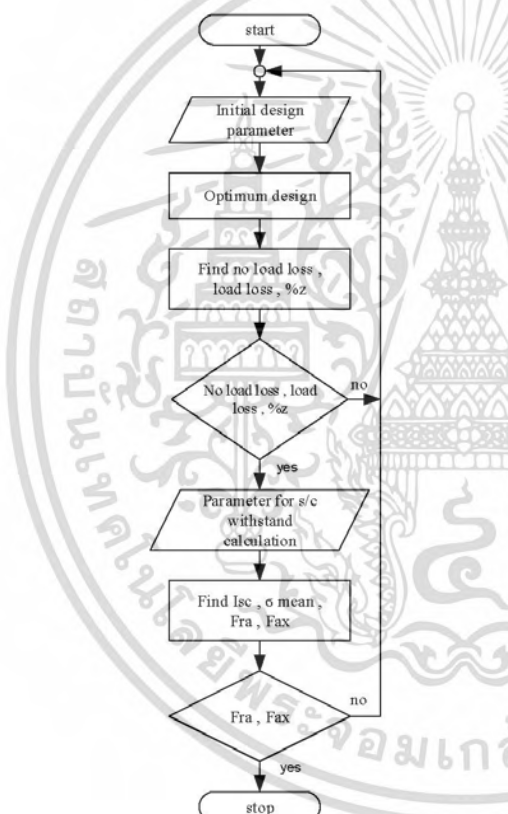


Figure 12 New proposed design algorithm and procedures considering short circuit withstand capability

The top oil temperature rise comparison between original regulation and new regulation of 400 kVA transformers at rated load are presented in Fig. 13.

It is clear that the new proposed design parameter will offer the lower temperature raised compare to the original design regulation.

Although the newly proposed designed algorithm for distribution transformer will offer the benefit in improving the short circuit current capability which will offer more system security. On the other hand, for the distribution utility side and consumer side, transformer losses and transformer lifetime are still the important concerns. Therefore,

Table 4. Comparison of transformer design parameter between original design regulation and the new regulation

Parameter	400 kVA	
	Original regulation	New regulation
1. No Load Loss, W - Guarantee - Test	720 700.5	720 610.0
2. Load Loss, W - Guarantee - Test	4150 4040.3	4150 3949.3
3. Total loss, W	4740.3	4559.3
4. Hottest-spot of top oil, °C	81.0	73.0
5. Hottest-spot of HV.wdg., °C	88.3	76.7
6. Hottest-spot of LV.wdg., °C	89.8	78.8
7. Top oil Temp. rise, °C - Guarantee - Test	60 51.0	60 42.0
8. Winding Temp. rise, °C - Guarantee - HV. Winding - LV. Winding	65 60.3 61.8	65 45.7 47.8

Table 5. Parameter required for calculation at short circuit withstand test (HV side)

Parameter	High voltage side	
	Original	New
Reactance, %	3.77	4.18
Resistance, %	1.11	1.10
Per unit impedance	0.00393	0.00432
Resistance per phase at 75 °C, Ohm/phase	11.82	11.05
Winding height (mm) : Hw	425	365
Number of turn per limb : N	2700	2600
Current density of winding (A/mm ²) : J	2.38	2.52
Mean diameter of winding (mm) : Dm	285	162
Radial of winding 1 : a1	-	-
Radial of winding 2 : a2	31	30
Width of main duct (mm) : d	12	11.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Received: May 10, 2018

18

Table 6. Parameter required for calculation at short circuit withstand test (LV side)

Parameter	Low voltage side	
	Original	New
Reactance, %	3.77	4.18
Resistance, %	1.11	1.10
Per unit impedance	0.00393	0.00432
Resistance per phase at 75 °C, Ohm/phase	0.00146	0.00125
Winding height (mm) : Hw	465	385
Number of turn per limb : N	27	26
Current density of winding (A/mm ²) : J	2.61	2.48
Mean diameter of winding (mm) : Dm	207	212
Radial of winding 1 : a1	22	23
Radial of winding 2 : a2	-	-
Width of main duct (mm) : d	12	11.5

Table 7. Forces and final temperature calculation results at short circuit withstand test (HV side)

Parameter	HV side	
	Original	New
Asymmetrical short circuit current (A)	304.57	285.20
ϕ	34.53	34.40
Radial force	1491.49	1351.47
Axial force	99.45	98.80
Final winding temp. (°C)	155.55	151.65

Table 8. Forces and final temperature calculation results at short circuit withstand test (LV side)

Parameter	LV side	
	Original	New
Asymmetrical short circuit current (A)	29015.09	27169.38
ϕ	23.77	22.32
Radial force	892.06	848.97
Axial force	62.69	59.26
Final winding temp. (°C)	166.73	150.09

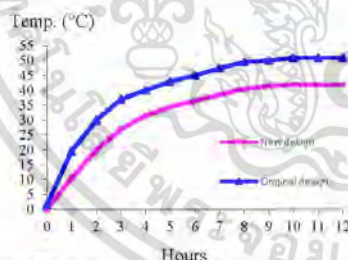


Figure 13 Top oil temperature rise comparison between original and new regulation 400 kVA at rated load

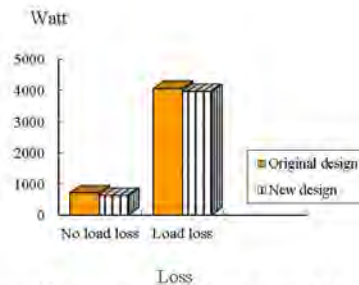


Figure 14 Loss comparison between original design compared to the newly proposed design/regulation

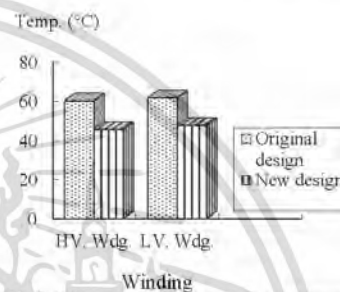


Figure 15 Winding temperature rise comparison between original and new regulation designs

Fig. 14 shows the loss comparison between original design and new proposed design. It is clear that the newly proposed design will offer lower losses which results in a better economics value, while Fig. 15 shows that the newly proposed design techniques will offer lower winding temperature rise which means a longer transformer lifetime.

4. Conclusion

From the test and analysis result, it is clear that information of temperatures obtained from the tested transformer during loading and short circuit will benefit for a newly proposed design algorithm to obtain more safety and economically of distribution transformer. In addition, result from Fig. 10 and 11, clearly show that it is only small difference between the measuring result and calculating result, therefore, this similarity trend can be used as a guideline for the distribution transformer design.

In conclusion, with the main finding and newly proposed design algorithm of this research, it can lower winding temperature of distribution transformer while loading or experiencing with short

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Received: May 10, 2018

19

circuit conditions which mean it can prolong transformer insulation and extend transformer lifecycle time. Therefore, it not only provides more safety transformer to reinforce power system security but also provides a lower losses transformer result in economics benefit for both utilities and end users in distribution system.

Acknowledgments

The author would like to Thank T.D.Transformer Co., Ltd. and Phongpimam Electric Co., Ltd. Thailand for supporting data and equipment of this work and would like to give a special thanks to both of the Electrical Engineering Departments at KMITL and Southeast Asia University for part of the financial supports.

References

- [1] C. Chompoo-inwai, W.J. Lee, P. Fuangfoo, M. Williams, and J. Liao, "System Impact Study for the Interconnection of Wind Generation and Utility System", *IEEE Transaction of Industrial Application*, Vol.41, No.1, pp.163-168, 2005.
- [2] T.C.B.N. Assuncao, J.L. Silvino, and P. Resende, "Transformer Top-Oil Temperature Modeling and Simulation", *International Journal of Energy and Power Engineering*, Vol.2, No.2, pp.958-963, 2008.
- [3] A.Y. Arabul, I. Scnl, F.K. Arabul, M.G. Aydeniz, Y. Oner, and G. Kalkan, "An Investigation on Hot-Spot Temperature Calculation Methods of Power Transformers", *International Journal of Energy and Power Engineering*, Vol.9, No.8, pp.1036-1040, 2015.
- [4] T. Qian, W.H. Tang, W.J. Jin, L.Gan, Y.Q. Liu, and G.J. Lu, "Comparisons of Transformer Top Oil Temperature Calculation Models Using Support Vector Regression Optimized by Genetic Algorithm", In: *Proc. of the 24th International Conf. on Electricity Distribution*, Glasgow, paper 0539, 2017.
- [5] A. Mamizadeh and I. Iskender, "Analyzing and Comparing the Hot-spot Thermal Models of HV/LV Prefabricated and Outdoor Oil-Immersed Power Transformers", *World Academic of Science, Engineering and Technology*, Vol.6, No.1, pp.34-39, 2012.
- [6] Z. Radakovic, U. Radoman, and P. Kostic, "Decomposition of the Hot-Spot Factor", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol.30, No.1, pp.403-411, 2015.
- [7] R.P.P. Smeets, L.H.TE. Paske, P.P. Leufkens, and T.F. Ogelberg, "Thirteen Years Test Experience with Short-Circuit withstand Capability of Large Power Transformer", In: *Proc. of Southern Africa Regional Conference*, pp.1-7, 2009.
- [8] P. Geno Peter, "Calculations for Short Circuit Withstand Capability of a Distribution Transformer", *International Journal of Advancements in Technology*, Vol.2, No.1, pp.142-150, 2011.
- [9] R. UI Hassan, U.T. Shami, and A. Safdar, "Evaluation of Losses and Life of Distribution Transformer under Non-linear Load using Wavelet Transform", In: *Proc. of International Conf. on the Pakistan Academy of Sciences*, pp.309-317, 2016.
- [10] Y. Bicen, Y. Cilliyuz, F. Aras, and G. Aydugan, "An Assessment on Aging Model of IEEE/IEC Standards for Natural and Mineral Oil-Immersed Transformer", In: *Proc. of IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, pp.1-4, 2011.
- [11] K.D. McBee and M.G. Simoes, "General Smart Meter Guidelines to Accurately Assess the Aging of Distribution Transformer", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.5, No.6, pp.2967-2979, 2014.
- [12] Provincial Electricity Authority Thailand (PEA), *Three-Phase Transformer for 22 kV and 33 kV Distribution Systems with Ability to Withstand Short Circuit*, Specification No. RTRN-035/2558, 2015.
- [13] B. Suechoey, N. Chotiwanaporn, P. Jayasak, and C. Chompoo-inwai, "Proposition of Individual Guide for Distribution Transformer Design to Withstand Short Circuit Condition", In: *Proc. of the 20th ICEE International Conference on Electrical Engineering*, pp.1-6, 2014.
- [14] B. Suechoey, W. Tangsrianukul, M. Leclajinda, and C. Chompoo-inwai, "Novel Techniques for Improving Short Circuit Withstand Capability of Distribution Transformer Considering Short Circuit Force and Winding Temperature", In: *Proc. of the 21st ICEE International Conference on Electrical Engineering*, pp.1-4, 2015.
- [15] IEC 60076-2, *Power Transformer Part 2: Temperature Rise*, 2011.
- [16] ANSI/IEEE C57.91, *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*, 1995.
- [17] IEC 60076-5, *Power Transformer Part 5: Ability to Withstand Short Circuit*, 2006.

International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.11, No.6, 2018

DOI: 10.22266/ijies2018.1231.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Received: May 10, 2018

20

- [18] IEC 354, *Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer*, 2006.
- [19] ANSI/IEEE C57.12.00, *American National Standard IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, 2010.
- [20] Bharat Heavy Electrical Ltd., *Transformer*, Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi, 2nd Edition, 2003.
- [21] S. Tadsuan, B. Suechoey, V. Kinnares, S. Bunjongit, and N. Kritsanajinda, "Testing of Temperature at Conductor and Oil of Mineral Oil-Immersed Transformer in order to be Criterion for Transformer Design", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol.23, No.2, pp.59-77, 2000.
- [22] B. Suechoey, S. Tadsuan, C. Thammarat, and M. Leelajindakrairerk, "An Analysis of Temperature and Pressure on Loading Oil-Immersed Distribution Transformer", In: *Proc. of the 7th International Power Engineering Conference*, pp.1-5, 2005.



International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.11, No.6, 2018

DOI: 10.22266/ijies2018.1231.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Novel Techniques for Improving Short Circuit Withstand Capability of Distribution Transformer Considering Short Circuit Force and Winding Temperature

Boonlert Suechoey Warawat Tangsrianukul Monthon Leelajindakraierk
Churirat Boonkhun and Chai Chompoo-inwai

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
tdlert@hotmail.com

Abstract

Fault contribution from various sources of mixed renewable generations creates new operation issues to many devices and equipment in the new smart grid system environment. The increase in fault level may affect not only the relay setting but also the protection schemes. Moreover, for the distribution transformer, the higher fault level may lead to deterioration of insulation winding and shorten the life cycle of the transformer. In addition, the short circuit force and stress in low voltage winding coil will also damage the shape of the coil. Therefore, in this research, we propose a new assessment technique to calculate: 1) short circuit force, 2) stress in low voltage winding and 3) transformer winding temperature under fault condition for a 160 kVA transformer with 3 phases, 50 Hz, 22kV-400/230V, Dyn 11. This 160 kVA transformer is considered as a popular size of distribution transformer in the mid-size industries in Thailand. Many key characteristics of tested-transformer will be compared and analyzed when a short circuit occurs, such as oil temperature, inner pressure of the transformer and winding temperature. Typically, following IEC standard, the processes and expense to have a short circuit withstand test on one distribution transformer is rather complicated and expensive. Therefore, with the newly proposed methodologies, one can have a simplified and low-cost design method while giving a better result for transformer insulation to increase the lifetime of distribution transformers.

Keywords

Winding temperature, Short circuit withstand, Hottest spot temperature, Short circuit forces

1. INTRODUCTION

When a short circuit occurs while a transformer is in operation, current will get higher. This, in turn, causes higher temperature in winding coil and damages insulation. The high current generates force on coil and the coil will be deformed and damaged. This paper proposes a method for calculating short circuit force and stress in low voltage winding, and coil's temperature during a short circuit in accordance to IEC

standard. We consider a 160 kVA, 3 phases, 50 Hz, 22 kV-400/230V, Dyn11 transformer which is widely used in Thailand's distribution system. The transformer is tested during short circuit whereas various parameters, such as oil temperature, winding temperature after a short circuit, short circuit force and stress, are calculated to improve transformer design that will improve short circuit withstand capability in accordance to the standard. A short circuit withstand test requires high test field power and is very costly. Therefore, the results from this paper can be used to adjust various parameters when designing a transformer, reduce the cost, and extend transformer insulation lifetime.

2. METHOD OF ANALYSIS

The insulation lifetime depends on the temperature and operation period. The degraded insulation occurs at the hottest spot temperature on the winding. If transformer has a short circuit, the temperature of winding will be extremely high which may cause the winding to deform due to short circuit force. As a result, when designing a transformer, we need to calculate temperature during rated load, force to the coil and the final temperature of the short circuited coil. In the calculation, we consider the following:

2.1 Specific Parameters from a Transformer Temperature Rise Test

In Thailand, according to Provincial Electricity Authority (PEA) standard and regulation, some critical designed-parameters need to be within the acceptance range. Details of related parameters are shown in equations as follows:

A. Average winding temperature rise

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

$$\Theta_{w2} = \frac{Rt2}{Rt1} (k + \Theta_{w1}) - k \quad (2)$$

where

Θ_{wr} is average winding rise ($^{\circ}\text{C}$)
 Θ_a is ambient temperature ($^{\circ}\text{C}$)
 Θ_{w1} is initial average winding resistance ($^{\circ}\text{C}$)
 Θ_{w2} is average winding resistance at shutdown ($^{\circ}\text{C}$)
 R_{t1} is winding resistance at ambient temperature (Ω)
 R_{t2} is winding resistance after switch off (graphical extrapolation)(Ω)
 $k = 234.5$ for copper, 224.5 for aluminum.

B. Top oil temperature rise at rated load (Θ_{or}), $^{\circ}\text{C}$

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

2.2 Transformer Short-Circuit Parameter According to IEC Standard

A. Asymmetrical short circuit current

The asymmetrical short circuit current will be calculated as follows:

$$I_{sc} = \sqrt{2} \times (1 + e^{\frac{-\pi R}{X}}) \times \left(\frac{I_{ph}}{EZ} \right) \quad (4)$$

where

I_{ph} is Rated phase current
 R is % Resistance
 X is % Reactance
 Ez is Per unit impedance

B. Calculation of radial forces

Axial leakage flux interacts with coil current generating radial force (F_r). Radial flux component interacts with coil current generating axial force. Both forces damage coil. In normal operation, the forces are minimal, but if the transformer is in short circuit, current and magnetic force will become very high. Thus, short circuit current must be calculated when designing a transformer. The radial force can be obtained from:

$$F_{rad} = 0.628 \times \left(\frac{N \times I}{H_w} \right)^2 \times \pi \times D_m \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (5)$$

where

D_m is mean diameter of the pair of windings (mm)
 H_w is geometrical average length of windings (mm)
 N is number of winding electrical turns (mm)
 I is rms value of winding current

$r = \frac{1}{EZ}$ is overcurrent factor

$$k = \left(1 + e^{\frac{-\pi R}{X}} \right) \text{ is peak amplitude factor}$$

C. Calculation of axial forces

The value of axial force at short circuit withstand test can be calculated by

$$F_{ax} = 0.628 \times \left(\frac{N \times I}{H_w} \right)^2 \times \pi \times D_m \times \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \times (2K - 1) \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (6)$$

where

d is width of the main duct
 a_1, a_2 are radial width of winding

The value of hoop stress at short circuit withstand test can be calculated by

$$\sigma_t = 0.314 \times \left(\frac{N \times I}{H_w} \right)^2 \times D_m \times J \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (7)$$

where

σ_t is hoop stress (N/mm^2)

2.3 Calculation of the Final Winding Temperature According to IEC Standard

The highest average temperature θ_f of the winding after short circuit can be calculated by the equation:

$$\theta_f = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{J^2 t} - 1 \quad \text{for copper} \quad (8)$$

where

θ_0 is the initial temperature (Celsius degree)

J is the short circuit current density (Amperes per square millimeter)

t is the duration (seconds).

3. TEST AND RESULTS

3.1 Temperature Rise Test

After carefully designed process to obtain the proper winding, insulation and all transformer's parameters, new prototype transformers are assembled. It should be noted that newly constructed units use class A insulation (temp. 105 degree C). The transformers are sealed type oil-immersed distribution transformers of 160 kVA 3 ph 50 Hz 22,000-400/230 V Dyn 11, to be tested under short circuit condition according to circuit in Fig 1 and Fig 2. The results from the proposed design technique are shown in Table 1, and the results from the test are shown in Table 2 and Fig. 3. The parameters required for calculation at short circuit

withstand test are shown in Table 3. The calculation results of winding parameters after short circuit condition are shown in Table 4.

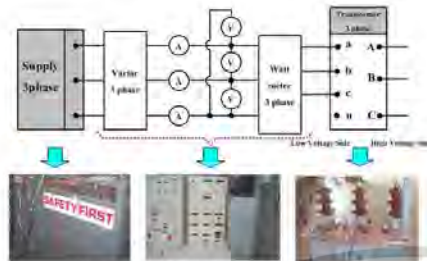


Fig. 1 Test circuit by open circuit test.

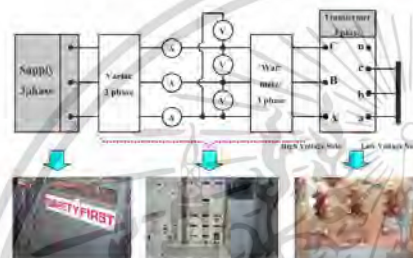


Fig. 2 Test circuit by short circuit test.

Table 1 Transformer data

Rated kVA (kVA)	160
Rated voltage (HV side) (kV)	22
Rated voltage (LV side) (V)	400/230
Vector group	Dyn 11
HV connection	Delta
LV connection	Star
Rated through current (HV winding) (A)	4.20
Rated through current (LV winding) (A)	230.94
Frequency (Hz)	50

Table 2 Temperature results at rated load

Capacity(kVA)	160
No load losses(W)	327.00
Load losses(W)	1881.10
Total losses(W)	2208.10
Hottest spot of top oil(°C)	72.00
Hottest spot of HV.wdg. (°C)	87.27
Hottest spot of LV.wdg. (°C)	84.87
Top oil temp. rise(°C)	43.00
HV.wdg. temp. rise(°C)	60.77
LV.wdg. temp. rise(°C)	58.37

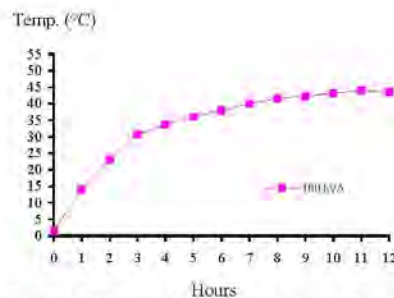


Fig. 3 Result of top oil temperature rise at rated load.

Table 3 Parameters required for calculation at short circuit withstand test

Parameter	Measured (HV side)	Measured (LV side)
Reactance (%)	3.76	-
Resistance (%)	1.10	-
Per unit impedance	0.0392	-
Resistance per phase at 75 deg. (ohm/phase)	39.66	0.008864
Winding height (mm) : Hw	390	400
Number of turn per limb : N	4500	45
Current density of winding (A/mm ²) : J	2.14	1.98
Mean diameter of winding (mm) : Dm	-	219
Copper thickness (mm)	36	16
Radial of winding 1 : a1	-	16
Radial of winding 2 : a2	36	-
Width of main duct	-	10.5
Short circuit current duration (sec.)	-	2.0

Table 4 Forces and final temperature calculation results at short circuit withstand test

Parameter	(HV side)	(LV side)
Asymmetrical short circuit current (A)	156.79	14964.61
σ_{mean} (N/mm ²)	20.54	12.01
Radial force (N)	656.74	396.29
Axial force (N)	42.18	24.81
Final winding temperature (°C)	145.52	139.39

4. CONCLUSION

This research proposes the analysis of the oil and transformer coil temperature rises at rated load, and the calculation of winding forces and final winding temperature at short circuit. The results can assist the transformer designers to analyze and decide on parameters for improved the short circuit withstand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

capability. The study indicates that we can analyze the transformer data at various rates and use the results to manufacture highly efficient transformers in accordance with the standard. Further research should be conducted on the analysis of insulation life and pressure inside transformer tank during short circuit for better transformer design. The research objective is to develop highly efficient and safe transformer manufacturing.

Acknowledgements

The authors would like to thank T.D. Transformer Co., Ltd. and Phongpimarn Electric Co., Ltd. Thailand for supporting data and equipments of this work.

References

- [1] ANSI/IEEE C57.12.00, *An American National Standard IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, 1993.
- [2] ANSI/IEEE C57.91, *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*, 1981.
- [3] IEC 354, *Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer*, 1991.
- [4] IEC 76-2, *Power Transformer Part 2 : Temperature Rise*, 1993.
- [5] IEC 76-5, *Power Transformer Part 5 : Ability to Withstand Short Circuit*, 2006.
- [6] Provincial Electricity Authority (PEA) Thailand, *Three-Phase Transformer for 22 kV and 35 kV Distribution Systems with Ability to Withstand Short Circuit*, Specification No.RTRN-035/2556, 2012.
- [7] Bharat Heavy Electrical Limited, *Transformer*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2nd Edition, 2003.
- [8] S.Tadsuan, B.Suechoey, V.Kinnares, S.Burjongjit and N.Kritsanajinda, "Testing of Temperature at Conductor and Oil of Mineral Oil-Immersed Transformer in order to be Criterion for Transformer Design," *KMUTT Research and Development Journal*, Vol.23 No.2, pp.59-77, May-August 2000.
- [9] B.Suechoey, S.Tadsuan, C.Thammarat and M.Leelajindakraierk, "An Analysis of Temperature and Pressure on Loading Oil-Immersed Distribution Transformer," in *Proceedings of The 7th International Power Engineering Conference*, 29 November – 2 December 2005, Marina Mandarin Hotel, Singapore.
- [10] Boonlert Suechoey, Naradon Chotiwanaporn, Premanan Jayasak, Chow Chompoo-inwai, and

Chai Chompoo-inwai, "Proposition of Individual Guide for Distribution Transformer Design to Withstand Short Circuit Condition," in *Proceedings of The 20th ICEE International Conference on Electrical Engineering*, June 15-19, 2014, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

www.icee2014.org


ICEE 2014


The International Conference on Electrical Engineering 2014




June 15-19, 2014 Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea

Sharing Solutions for Secure and Sustainable Energy

Abstract Submission	December 31, 2013
Notification of Abstract Acceptance	January 15, 2014
Full Paper Submission	February 28, 2014
Notification of Full Paper Acceptance	March 15, 2014
Author/Pre-Registration	April 15, 2014



Organized by  KIEE

Co-organized by  CSEE  HKIE  IEEJ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proposition of Individual Guide for Distribution Transformer Design to Withstand Short Circuit Condition

Boonlert Suechoey *, Naradon Chotiwanaporn*, Premanan Jayasak*,
Chow Chompoo-inwai *, and Chai Chompoo-inwai *

Abstract – Under the new era of renewable energy generation mixed, a traditional power system has been changed to the new environment which power systems may compose of many intermittent resources of power such as solar and wind power. These situations result in the revolution not only power system configurations but also operation conditions of existing power equipment, especially, the distribution transformer. Therefore, this paper presents an approach for the novel design and analysis of distribution transformers in order to withstand the overloading and short circuit conditions in comply with both ANSI/IEEE and IEC standard. Typically, when the short circuit current occurs, it will result in winding temperature increasing and cause insulation deteriorate. In this study, various designed parameters such as flux density, current density, wire size, insulation thickness are compared and investigated. In Thailand, because of they are considered as a popular size of distribution transformer, therefore, the basic data for the 100 kVA and 250 kVA transformers with 3 phase 50 Hz 22 kV-400/230 V Dyn 11 have been carefully designed and produced the prototype transformers in order to test the temperature characteristics under heavy loading and short circuit condition. Many keys information will be analyzed such that oil temperature, winding temperature after a short circuit, short circuit current etc. Results of these study and analysis will be benefit for and can be used as a reference for those who want to select and utilize proper distribution transformers to withstand a short circuit condition. Finally, the analysis results, will enable transformer designers to have a better design of the transformer insulation last longer and increasing the lifetime of those designed transformer.

Keywords: Transformer design, Winding temperature, Short circuit withstand, Hottest spot temperature

1. Introduction

Thailand Power Development Plan (2010-2030 (PDP2010) was first approved by Thailand Nation Energy Policy Council (NEPC) on March 12th, 2011 and then was endorsed by the Cabinet on March 23rd, 2011. This first revision of PDP2010 focused on security and adequacy of power system along with the national policies on the aspects of environment concern, energy efficiency and renewable energy promotion [1]. By the way, because of the new government policies and the variation of current economic situation which induce changes and fluctuation in both demand and power supply all over the country. Therefore, on November 30th, 2011 the new Cabinet approved the PDP2010: revision3 with two crucial energy plans so called:

1) The 20-Year Energy Efficiency Development Plan

* Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand (tllert@hotmail.com)

(EE 2011-2030); this policy is targeting on 25 percent reduction of Energy Intensity (EI) of the country within 20 years (EI is the ratio of energy consumption to GDP), resulting in the decrease of country's power demand projection.

2) The 10-Year Alternative Energy Development Plan (AEDP 2012-2021): This policy is targeting on increasing the share of renewable energy use by 25 percent instead of fossil fuels within the next 10 years, resulting in replacement of some conventional power plant by renewable power plants.

According to the current PDP2010 rev.3, during the year 2012-2030, the country will have the new installed capacity of mixed renewable resources for electricity generation almost up to 15,000 MW. These fuel-mixed generations may compose of solar power, wind power, hydro power, biomass, biogas and municipal solid waste (MSW). However, Solar and wind power will pay a significant role under this environment because the total capacity of these two resources can be reached to 5,000 MW.

Under this new environment, the traditional power system will dramatically be changed. These situations can lead to many impacts on power system operation issues including: system re-configurations, power flow re-pattern, protection schemes, stability and reliability issues etc. In order to prepare for this newly configuration changed, Provincial Electricity Authority (PEA), the utility agency, who responsible for the distribution network all over the country has developed the new rules and regulation program for any newly installed distribution transformer. This regulation will require the distribution transformer to withstand short circuit conditions for more safety and more reliable on system operation under the mixing intermittent renewable generations. Typically, after the transformer experienced with the short circuit conditions, the winding temperature will radically increase. This high temperature can deteriorate the winding insulation and shorten the transformer life time.

Therefore, this paper proposes the method to evaluate the final winding temperature of distribution transformer after short circuit condition. In addition, the newly design technique for choosing and optimizing the proper design parameter of distribution transformer are also proposed and recommended.

2. Method of Analysis

The insulation aging depends on the thermal transformer and operating time. The degraded insulation occurs at the hottest spot temperature on the winding. In order to obtain the precisely estimation of winding temperature, necessary test procedures and key equations will required as follows:

2.1 Specific Parameters from a Transformer Temperature Rise Test

In Thailand, according to PEA standard and regulation, some critical designed-parameter needs to be within the acceptance range. Details of related parameter are shown in equation as follows:

1. Average winding temperature rise

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

$$\Theta_{w2} = \frac{Rt2}{Rt1} (k + \Theta_{w1}) - k \quad (2)$$

where

Θ_{wr} is average winding rise, °C

Θ_a is ambient temperature, °C

Θ_{w1} is initial average winding resistance, °C

Θ_{w2} is average winding resistance at shutdown, °C

R_{t1} is winding resistance at ambient temperature, Ω

R_{t2} is winding resistance after switch off (graphical extrapolation), Ω

$k = 234.5$ for copper, 224.5 for aluminum

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

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

2.2 Parameter from Transformer Short-Circuit According to ANSI/IEEE Standard

In the analysis of transformer short circuit conditions, one needs to calculate various parameters of the following equation.

1. Short-circuit current duration shall be determined as follows:

$$t = \frac{1250}{I^2} \quad (4)$$

where

t is short-circuit current duration, in second

$I = \frac{I_{sc}}{I_R}$ is symmetrical short-circuit current, in multiples of normal base current

NOTE:

Equation (4) applies to no larger than 500 kVA transformer at the transformer that is larger than the duration of the short circuit should not exceed 2 seconds by default.

2. Short-circuit current calculation shall be as follows.

- 2.1 Symmetrical current shall be determined as follows:

$$I_{SC} = \frac{I_R}{z_T + z_S} \quad (5)$$

where

I_R is rated current, in rms amperes

Z_T is transformer impedance, in per unit

Z_S is impedance of the system, in per unit

NOTE:

This paper discusses short circuit the terminals of the transformer without charge on impedance of the system. (Short circuit current is maximum).

- 2.2 Asymmetrical current shall be determined as follows:

$$I_{SC(pk asym)} = KI_{SC} \quad (6)$$

where

$$K = [1 + (e^{-(\phi + \pi/2)r/X}) \sin \phi] \sqrt{2}$$

e is base of natural logarithm

\varnothing is arctan x/r , in radian

x/r is ratio of effective alternating-current reactance to resistance, both in ohms

2.3 Calculation of winding temperature during a short circuit

The final winding temperature (T_f) at the end of short circuit shall be determined as follows:

$$T_f = (T_k + T_s) \cdot m(1 + E + 0.6m) + T_s \quad (7)$$

where

$$m = \frac{(w_s)t}{C(T_k + T_s)} \quad (8)$$

One should be noted that these equations are the approximate formulas, and should be restricted to value s of $m = 0.6$ and less. For values of m in excess 0.6, T_f shall be as follows:

$$T_f = (T_k + T_s) \left[\sqrt{e^{2m} + E(e^{2m} - 1)} - 1 \right] + T_s \quad (9)$$

where

T_k is 234.5 for copper, 224.5 for aluminum

T_s is starting temperature. It is equal to:

(1) 30 °C ambient temperature plus the average winding rise plus the manufacturer's recommended hottest spot allowance; or

(2) 30 °C ambient temperature plus the limiting winding hottest spot temperature rise specified for the appropriate type of transformer.

e is base of natural logarithm ≈ 2.718

E is per unit eddy current loss, based on resistance loss W_s , at starting temperature

$$E = E_r \left[\frac{T_k + T_r}{T_k + T_s} \right]^2 \quad (10)$$

E_r is per-unit eddy current loss at reference temperature

T_r is reference temperature:

$\approx 20^\circ\text{C}$ ambient temperature plus rated average winding rise.

W_s is short-circuit resistance loss of winding at the starting temperature, in watts per pound of conductor

$$W_s = \frac{W_r N^2}{M} \times \left(\frac{T_k + T_s}{T_k + T_r} \right) \quad (11)$$

W_r is resistance loss of winding at rated current and reference temperature, in watt

N is symmetrical short circuit magnitude, in times normal rated current

M is weight of winding conductor, in pounds

C is average thermal capacitance per pound of conductor and its associated turn insulation, in watt-

seconds per degree Celsius. It shall be determined by iteration from either of the following empirical equation:

$$C = 174 + 0.0225(T_s + T_f) + 110(A_i/A_c) \text{ for copper} \quad (12)$$

$$C = 405 + 0.1(T_s + T_f) + 360(A_i/A_c) \text{ for aluminum} \quad (13)$$

where

A_i is cross-sectional area of turn insulation

A_c is cross-sectional area of conductor

2.3 Calculation of the Final Winding Temperature according to IEC Standard

The highest average temperature θ_1 attained by the winding after short circuit shall be calculated by the equation:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{J^2 t} - 1 \text{ for copper} \quad (14)$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 225)}{J^2 t} - 1 \text{ for aluminium} \quad (15)$$

where

θ_0 is the initial temperature, in degrees Celsius

J is the short circuit current density, in amperes per square millimeter

t is the duration, in seconds

Table 1 Maximum permissible values of average temperature of the winding after short circuit (θ_1) [1], [5]

Transformer type	Insulation system temperature (°C)	Maximum values of θ_1	
		Copper	Aluminium
Oil-immersed	105 (A)	250 °C	200 °C

3. Test and Results

3.1 Temperature Test

After carefully designed process to obtain the proper winding, insulation and those all transformer's parameter, two new prototype transformers were assembled. It should be noted that newly constructed units use class A insulation (temp. 105 degree C). Those two transformers are sealed type oil-immersed distribution transformer of 100 kVA and 250 kVA 3 ph 50 Hz 22,000-400/230 V Dyn 11 and to be tested under short circuit condition according to circuit in Fig 1. The results from the proposed design technique was shown in Table 2 and the results from tested was shown in

Table 3 and Fig. 2. The calculation results of winding parameter after experienced short circuit condition was shown in Table 4.

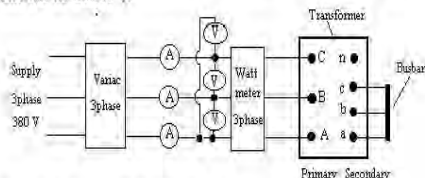


Fig. 1 Test circuit by short circuit test.

Table 2 Designed parameter from the proposed design

Capacity (kVA)	100	250
Flux density (T)	1.69	1.70
Cross-section area of conductor	53.29	155.04
Current density (A/mm ²)	2.71	2.33
Weight of copper (lb)	79.89	195.90
Number of turn	56	39

Table 3 Temperature results at rated load

Capacity(kVA)	100	250
No load losses(W)	237.4	478.5
Load losses(W)	1454.7	2852
Total losses(W)	1692.1	3330.5
Hottest spot of top oil(°C)	75.0	80.0
Hottest spot of HV.wdg. (°C)	82.14	87.1
Hottest spot of LV.wdg. (°C)	81.19	87.9
Top oil temp. rise(°C)	44	48.9
HV.wdg. temp. rise(°C)	51.64	56
LV.wdg. temp. rise(°C)	52.19	56.8

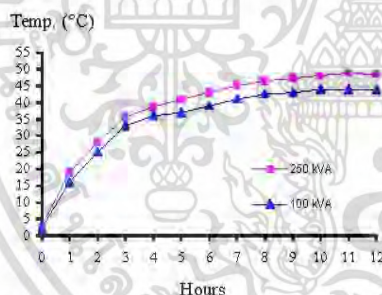


Fig. 2 Result of top oil temperature rise at rated load.

Table 4 Calculation results of winding parameter after short circuit condition

Capacity (kVA)	100	250
Impedance (pu.)	0.0378	0.0429
resistance(mΩ)	21.37	5.01
Rate current (A)	144.34	360.85
Short circuit current (A)	3818.52	8411.42
m	0.210	0.206
Short circuit current duration (sec.)	1.79	2.30
Final winding temperature (°C)	190.28	195.09

4. Analysis Results

After performed the short circuit test for two tested transformer (100 kVA unit and 250 kVA unit), it can be seen in Table 2 that for the two tested transformer, after 12 hours full loading, the top oil temperature rise can grow up to 50 degree C and one can estimate the final winding temperature of the tested transformer by using either equation (7) or (9) or (14) proposed in this paper. From the experimental result in Table 4, the final winding temperature, after short circuit condition, can grow up to 195 degree C. Moreover, for the tested transformer 100 kVA and 250 kVA, they will require approximately 2 second to have a test under short circuit condition. This result provide a useful information and a simplify analysis method for all the transformer users, designers or manufacturers before they will choose or design the new size of transformer.

In addition, the authors have used the newly proposed technique to design another five different units of 100 kVA transformers and another five different units of 250 kVA (Showing in Fig 3-6). Each one unit will have different designed parameter such as the designed flux density, the area of insulation or the area of the winding conductor etc. The main objective to do these various designs is to find a proper set of designed parameter for a save (optimum losses) and safety (short circuit withstand) operation conditions.

Fig. 3 and 4 show the final winding temperature after the tested transformer experienced with 2.20 second short circuit duration. It can be seen that the longer fault duration time the higher in final winding temperature. However, as seen from both figures, the final winding temperature for both sizes of transformer are still within the limit of 250 degree C. (Stated in Table 1 according to ANSI/IEEE and IEC)

Result from figure 5 imply that the ratio between area of copper conductor and the area of insulation play a significant effect to overall transformer temperature following short circuit condition. The higher area of insulator compare to conductor will result in the lower in temperature rise.

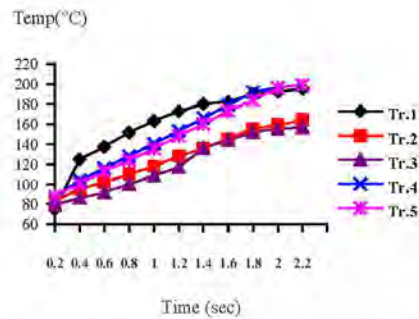


Fig. 3 Final winding temperature comparison of five 100 kVA transformers following short circuit condition

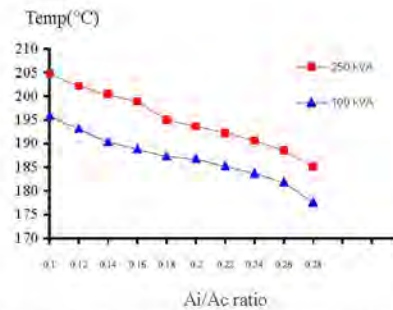


Fig. 5 Final winding temperature comparison of 100 kVA and 250 kVA unit at different A_i/A_c ratio

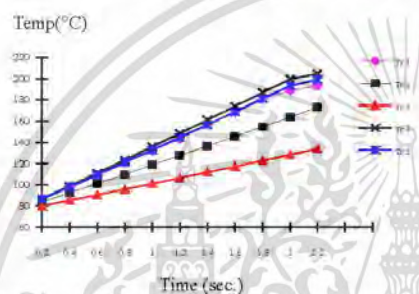


Fig. 4 Final winding temperature comparison of five 250 kVA transformers following short circuit condition

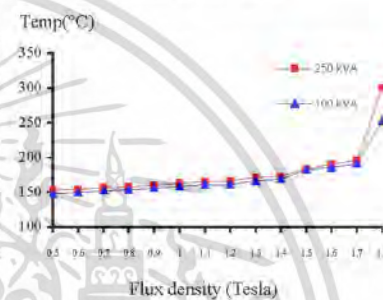


Fig. 6 Final winding temperature comparison of 100 kVA and 250 kVA unit at different flux density designed

Moreover, result from figure 6 shows one of the important designed parameter, flux density. This parameter has a direct relationship with eddy current loss and winding temperature rise. It should be noted that transformer designed with a higher flux density will result in the higher winding temperature rise. From the study result, it is recommending to use the value of 1.6-1.7 flux density to obtain the optimum design parameter. Typically, the recommend practice to reduce eddy current losses is to increase the cross section area of transformer core. From the experimental result, if one have designed the distribution transformer with flux density less than 1.7 tesla, the temperature rise after short circuit condition trend to fall below 200 degree C. However, during the transformer designed processes, one need carefully consider all parameter in table 2 because those all parameter will directly affect to the capital cost of each transformer.

5. Conclusion

This research paper proposes the method to estimate the short circuit current, short circuit duration, and final winding temperature of distribution transformer following short circuit condition. The estimated result above will provide a simple yet useful tool for all transformer users and designers. In addition, the newly design technique for choosing and optimizing the proper design parameter of distribution transformer are also proposed and recommended. Such parameters are the size of winding conductor, the area of insulation, type and size of material use to build a transformer and etc. All those parameter have direct effect on the final winding temperature of the designed transformer. The proper designed parameters of the transformer not only imply the lower losses characteristic but also the longer capability to withstand short circuit condition and increasing the life cycle of the transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acknowledgements

The authors would like to Thank T.D.Transformer Co., Ltd. and Phongpimam Electric Co., Ltd. Thailand for supporting data and equipments of this work.

References

- [1] ANSI/IEEE C57.12.00, *An American National Standard IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, 1993.
- [2] ANSI/IEEE C57.91, *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*, 1981.
- [3] IEC 354, *Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer*, 1991.
- [4] IEC 76-2, *Power Transformer Part 2 : Temperature Rise*, 1993.
- [5] IEC 76-5, *Power Transformer Part 5 : Ability to Withstand Short Circuit*, 2006.
- [6] Provincial Electricity Authority(PEA) Thailand, *Three-Phase Transformer for 22 kV and 33 kV Distribution Systems with Ability to Withstand Short Circuit*, Specification No.RTRN-035/2556, 2012.
- [7] Bharat Heavy Electrical Limited, *Transformer*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2nd Edition, 2003.
- [8] S.Tadsuan, B.Suechoey, VKinnares, S.Bunjongjit and N.Kritsanajinda, "Testing of Temperature at Conductor and Oil of Mineral Oil-Immersed Transformer in order to be Criterion for Transformer Design," *KMUTT Research and Development Journal*, Vol.23 No.2, pp.59-77, May-August 2000.
- [9] B.Suechoey, S.Tadsuan, C.Thammarat and M.Leelajindakrairerk, "An Analysis of Temperature and Pressure on Loading Oil-Immersed Distribution Transformer," in *Proceedings of The 7th International Power Engineering Conference*, 29 November – 2 December 2005, Marina Mandarin Hotel, Singapore.

Boonlert Suechoey

He received B.S. and M.Eng. degree in electrical engineering from South East Asia University and KMITL, respectively. His research interests are electrical machines design, renewable energy and power system analysis.

Chai Chompoo-inwai

He received B.S. and M.S. degrees in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute Technology of Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand in 1995 and 1997, respectively. He received Ph.D. in Electrical Engineering from University of Texas at Arlington in 2005.

He joined KMITL as a faculty member since 1995. His

research areas are on power system analysis, transient and dynamic stability, transmission congestion management in electricity deregulation, renewable power planning and illumination engineering.

Chow Chompoo-inwai

He received B.S. and M.S. degrees in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute Technology of Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand, respectively. He received Ph.D. in Electrical Engineering from Clarkson University in 2007.

He joined KMITL as a faculty member since 1997. His research areas are on power system analysis, transient and dynamic stability, transmission congestion management in electricity deregulation, renewable power planning and illumination engineering.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายบุญเลิศ สือเฉย
วัน เดือน ปีเกิด 16 พฤศจิกายน 2511 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ 327 ซอยเพชรเกษม 84 ถนนเพชรเกษม
แขวงบางแคเหนือ เขตบางแค กรุงเทพฯ 10160
โทร.0-2455-6923, 081-920-2195

ประวัติการศึกษา 2537 อดุสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
2543 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน

1. ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
2. การตรวจเช็ค การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง
3. ทำงานวิจัยด้านหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบไฟฟ้ากำลัง และพลังงานทดแทน

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2535 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

พ.ศ. 2538 – ปัจจุบัน วิศวกรออกแบบ การตรวจเช็ค และการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง

พ.ศ. 2555 – ปัจจุบัน วุฒิวิศวกรไฟฟ้ากำลัง (วพก.955)

ผลงานทางวิชาการขณะศึกษา

1. Boonlert Suechoey, Jongrak Boonseng, Chow Chompooinwai and Chai Chompooinwai, “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)*, Vol.11, No.6, 2018, pp. 11 – 20.
2. B. Suechoey, W. Tangsrianukul, M. Leelajinda, and C. Chompoo-inwai, “Novel Techniques for Improving Short Circuit Withstand Capability of Distribution Transformer Considering Short Circuit Force and Winding Temperature”, In: *Proc. of The 21th ICEE International Conference on Electrical Engineering*, The University of Hong Kong, Hong Kong, 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. B. Suechoey, N. Chotiwanaporn, P. Jayasak, and C. Chompoo-inwai, "Proposition of Individual Guide for Distribution Transformer Design to Withstand Short Circuit Condition", In: *Proc. of The 20th ICEE International Conference on Electrical Engineering*, Jeju, Korea, 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้