

การทดสอบและทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน
เมื่อสภาวะโหลดไม่เป็นเชิงเส้นด้วยเรกติไฟเออร์ 1 เฟส
Testing and Prediction the Temperature of Oil-immersed Transformer
when Non-linear Load Condition with 1 Phase Rectifier

สิริวิช ทัดสวน และประสิทธิ์ สุขเสริม

Siriwich Tadsuan and Prasit Sukserm

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

Faculty of Engineering, Southeast Asia University

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการทดสอบและทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน เมื่อสภาวะโหลดเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาฮาร์โมนิกและอุณหภูมิของหม้อแปลง รวมถึงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทำนายที่อุณหภูมิน้ำมันด้านบนและที่จุดร้อนสุดของหม้อแปลง ขั้นตอนการทดสอบ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ที่บริเวณขดลวดและที่น้ำมันด้านบนของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน ขนาด 10kVA ชนิด 3 เฟส แบบ D/Y ใช้เรกติไฟเออร์แบบบริดจ์ ตัวเก็บประจุและแท่งความร้อนต่อเป็นโหลดของหม้อแปลง บันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ บันทึกกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้วยเพาเวอร์มิเตอร์และสโตเรจออสซิลโลสโคป จากนั้นนำค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ ผลที่ได้จากการวิจัยทำให้ทราบว่าขนาดของกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับไม่เกินจากข้อกำหนด อุณหภูมิที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิมีค่าสูงสุดที่ 97.42°C ผลการทดสอบเทียบกับทำนายบริเวณน้ำมันด้านบนและบริเวณจุดร้อนสุดของหม้อแปลงมีค่าร้อยละผิดพลาดสัมพัทธ์ 2.00, 3.41 เรียงตามลำดับ

คำสำคัญ: หม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน, โหลดไม่เชิงเส้น, จุดร้อนสุด, น้ำมันด้านบน, ฮาร์โมนิก

Abstract

This paper presents the testing and prediction of the temperature of oil-immersed transformer when the load condition is non-linear. The purpose is to study the harmonic temperature of the transformer, compare temperatures of test results with prediction of top oil and at the hottest-spot of the transformer. Test procedure for installing thermocouple type K at the coil area and at the top oil of the oil-immersed transformer, type 3 phase, 10 kVA, D/Y. Use of bridge rectifier, capacitor and heater are the loads of the transformer. Temperature of transformer was recorded by a temperature recorder while current and voltage of transformer were recorded a power meter and storage oscilloscope. The temperature obtained from the test is compared with the value obtained from the mathematical model. The results of the research indicate that the harmonic currents are not

exceeded limit of standard. The secondary winding temperature is 97.42 °C. The test results compared with the prediction of the top oil area and hottest-spot area of the transformer had a relative error of 2.00, 3.41 respectively.

Keywords: oil-immersed transformer, non-linear load, hottest-spot, top oil, harmonic



บทนำ

ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้านั้น จะทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียและความร้อนที่เพิ่มขึ้นกับ ตัวหม้อแปลงไฟฟ้าเอง ถ้าหม้อแปลงมีอุณหภูมิที่สูงจะ ทำให้ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด ต่ำกว่าปกติ ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดขนาดการจ่าย กระแสของหม้อแปลงก็คืออุณหภูมิ จากงานวิจัยของ สิริวิช ทัดสวน และคณะ (Tadsuan et al., 2000); Linden (1992) ได้ทดสอบหาอุณหภูมิของตัวหม้อแปลงที่ตำแหน่ง ต่าง ๆ กรณีใช้แหล่งจ่ายสัญญาณชายน์ เช่น จุดร้อนสุด ของลวดตัวนำ อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของลวดตัวนำ อุณหภูมิ ของน้ำมันด้านบน อุณหภูมิเพิ่มแตกต่างระหว่างน้ำมันกับ ขดลวดและค่าเวลาความร้อนของน้ำมันคงตัว และสิริวิช ทัดสวน (Tadsuan, 2009) ได้ทดสอบและวางแผนการ จ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน เมื่อสภาวะ โหลดแบบไม่เชิงเส้นในเขตกรุงเทพฯ ฯ และพื้นที่ใกล้เคียง โดยมีเงื่อนไขการทดสอบกรณีที่กำหนดใช้แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์แบบอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปี เทียบ กับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี (แบบสัญญาณ ชายน์สองชั้น) ซึ่งผลการจำลองทำให้ทราบว่า การใช้แบบ จำลองแบบอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี ให้ค่า ความน่าจะเป็นมากกว่าแบบอุณหภูมิแวดล้อมคงที่ตลอดปี และการปรับช่วงเวลาการใช้พลังงานมาก ๆ ให้ไปอยู่ช่วง ตอนกลางคืน ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิแวดล้อม ต่ำกว่าตอน กลางวัน สามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลง

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อทดสอบหากระแสและแรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงในกรณีที่โหลดเป็นแบบ 1 เฟสไม่เชิงเส้น ว่ามี ปริมาณฮาร์มอนิกขนาดเท่าใด

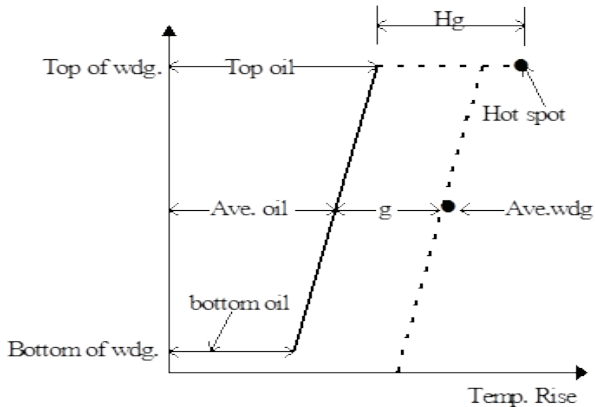
2. เพื่อทดสอบหาอุณหภูมิหม้อแปลงที่ตำแหน่ง ต่าง ๆ ในกรณีที่โหลดเป็นแบบ 1 เฟสไม่เชิงเส้น ว่ามี ความแตกต่างกันมากน้อยหรือไม่

3. เพื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิหม้อแปลงที่ได้จาก การทดสอบและการทำนายจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ มีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จาก American National Standard Institute (1981) เป็นการแนะนำเกี่ยวกับการจ่ายกระแสให้กับโหลด ของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันโดยพิจารณาในเรื่องความร้อน ตำแหน่งต่าง ๆ ในหม้อแปลง เพื่อหาจุดความร้อนวิกฤต ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดที่มีความร้อนสูงจะทำให้ฉนวนหม้อแปลง เกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ อายุของฉนวนหรือค่า ความเสื่อมสภาพของฉนวนจะขึ้นกับความร้อนและเวลา ค่าความเสื่อมสภาพมาก ที่บริเวณจุดร้อนสุด จากผลการ วิจัยของ Linden (1994); Susa and Nordman (2009); Pradhan and Ramu (2003); Srinivasan and Krishnan (2013) ได้มีการทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน แต่พิจารณาเฉพาะที่ภาระเป็นเชิงเส้นเท่านั้น และ (Inter- national Electrotechnical Commission, 1991) ได้มี การตั้งสมมุติฐานเกี่ยวกับความร้อนที่หม้อแปลงดังภาพ 1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ (1) อุณหภูมิน้ำมันภายใน หม้อแปลงที่เพิ่มขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบนจะเพิ่มเป็น เชิงเส้น (2) อุณหภูมิเพิ่มของตัวนำทุก ๆ ตำแหน่งของ ขดลวดจะมีค่าเพิ่มเป็นเชิงเส้นและขนานกับเส้นอุณหภูมิ เพิ่มของน้ำมัน โดยมีค่าความแตกต่างคงที่ (θ) ระหว่าง เส้นทั้งสอง (3) อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดจะสูงกว่าอุณหภูมิ เพิ่มของตัวนำที่ด้านบน เนื่องมาจากค่าสูญเสียปลิกย่อย (stray loss) ที่เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างจุดที่

ร้อนสุดของขดลวดด้านบนกับน้ำมันด้านบน ได้จากค่า H คูณกับ g โดยที่ H เป็นตัวประกอบมีค่าจาก 1.1 ถึง 1.5 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของหม้อแปลง ซึ่งกำหนดให้หม้อแปลงจำหน่าย มีค่าเท่ากับ 1.1 และหม้อแปลงกำลังขนาดกลาง และขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 1.3



ภาพ 1 แผนผังความร้อนของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน

อุณหภูมิหม้อแปลงเมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

อุปกรณ์ที่กินกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิก ทำให้หม้อแปลงมีความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลกับอายุใช้งานสั้นลง จาก Linden (1996) พัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์หาค่าอุณหภูมิหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันชนิด ONAN โดยใช้วิธีการนำ K-Factor มาร่วมพิจารณาด้วย ซึ่งแสดงได้ดังสมการ 1-4 ที่สภาวะคงตัว

$$\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[\frac{P_T}{P_{TR}} \right]^{0.8} \quad (1)$$

$$P_{TR} = P_{CuR} + P_{coreR} + P_{tan kR} \quad (2)$$

สิริวิช ทัดสวน และคณะ (Tadsuan et al., 2004) ได้ทำการวิจัยค่า P_{core} เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่ %THD_V ของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าต่ำ ค่า P_{core} จะมีค่าใกล้เคียงกับ P_{coreR} และ $P_{tan k}$ มีค่าใกล้เคียงกับ $P_{tan kR}$ ดังนั้น

$$P_T = P_{LL(total)} + P_{coreR} + P_{tan kR} \quad (3)$$

$$P_{LL(total)} = \sum_{h=1}^{h=\max} (I_h)^2 \cdot R_h \quad (4)$$

เมื่อ P_T คือ กำลังสูญเสียรวม, W

P_{TR} คือ กำลังสูญเสียรวมที่พิกัด, W

$P_{LL(total)}$ คือ กำลังสูญเสียรวมขณะมีโหลด, W

P_{CuR} คือ กำลังสูญเสียที่ขดลวดที่พิกัดหม้อแปลง, W

P_{coreR} คือ กำลังสูญเสียแกนเหล็กที่พิกัดหม้อแปลง, W

$P_{tan kR}$ คือ กำลังสูญเสียที่ถังหม้อแปลงที่พิกัดหม้อแปลง, W

I_h คือ กระแสไฟฟ้าประสิทธิผลของฮาร์มอนิกลำดับ h , A

R_h คือ ความต้านทานที่ฮาร์มอนิกลำดับ h , Ω

Θ_{ou} คือ อุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายน้ำมันด้านบนที่ทุก ๆ โหลด, °C

Θ_{or} คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด, °C

จาก American National Standard Institute (1981) ที่สภาวะชั่วคราว

$$\Theta_{ot} = \Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5)$$

Θ_{oi} คือ อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นน้ำมันด้านบน, °C

Θ_{ot} คือ อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่โหลดใด ๆ ในสภาวะชั่วคราว, °C

τ คือ ค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัว, ชั่วโมง

t คือ ช่วงเวลาการต่อโหลดของหม้อแปลง, ชั่วโมง

จากงานวิจัยของ Linden (1996) ดังสมการ 6

$$\Theta_{gu} = \left[\frac{1 + [(K - \text{factor}) \times 0.08]}{1 + 0.08} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (6)$$

และจาก International Electrotechnical Commission (1991) ดังสมการ 7

$$\Theta_{gr} = H \cdot g_r \quad (7)$$

Θ_{gr} คือ อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด, °C

Θ_{gu} คือ อุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายของจุดร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่ทุก ๆ โหลด, °C

K-factor คือ ตัวประกอบ เค

g_r คือ อุณหภูมิเพิ่มแตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดที่พิกัดโหลด, °C

H คือ ตัวประกอบอุณหภูมิจุดร้อนสุด จาก International Electrotechnical Commission (1991) เมื่อเป็นแบบ ONAN มีค่ากำหนดไว้ที่ 1.1

จากสมการ 6 เป็นการทดสอบที่ $(I_{rms})^2 \cdot R_{dc}$ ที่พิกัดโหลด แต่ในสภาพความเป็นจริงนั้น ค่าระดับโหลดที่เกิดขึ้น

จริงอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้หลาย ๆ ค่า ทำให้สามารถปรับเป็นสมการ 8-10

$$\Theta_{gu} = \left[\frac{\left(\frac{(I_{rms})^2 R_{dc}}{(I_{rms_R})^2 R_{dc}} \right) + [(K - factor) \times 0.08]}{1 + 0.08} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (8)$$

$$\Theta_{gu} = \left[\left(\frac{\left(\frac{(I_{rms})^2 R_{dc}}{(I_{rms_R})^2 R_{dc}} \right) + [(I_{rms_R})^2 R_{dc} \times (K - factor) \times 0.08]}{1 + 0.08} \right) \times \left(\frac{(I_{rms_R})^2 R_{dc}}{(I_{rms_R})^2 R_{dc}} \right) \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (9)$$

$$\Theta_{gu} = \left[\left(\frac{[(I_{rms})^2 R_{dc}] + [(I_{rms_R})^2 R_{dc} \times 0.08 \times (K - factor)]}{[(I_{rms_R})^2 R_{dc}] + [0.08 \times (I_{rms_R})^2 R_{dc}]} \right) \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (10)$$

เมื่อ I_{rms} คือ กระแสไฟฟ้าประสิทธิผล, A

ดังสมการ 11-12

I_{rms_R} คือ กระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่พิกัดหม้อแปลง, A

$$P_{ecw_R} = 0.02 \times (I_{rms_R})^2 R_{dc} \quad (11)$$

R_{dc} คือ ความต้านทานกระแสตรง, Ω

$$P_{ecw_H} = 4 \times P_{ecw_R} = 0.08 \times (I_{rms_R})^2 R_{dc} \quad (12)$$

จาก Linden (1996) ได้พิจารณาค่าสูงสุดต่อหน่วยของค่าสูญเสียกระแสไหลวนมีค่า 2.0% ของ R_{dc} และได้สมมติค่าสูญเสียกระแสไหลวนที่จุดร้อนสุดมีค่าเป็น 4 เท่าของค่าเฉลี่ยของค่าสูญเสียกระแสไหลวน

ทำให้สามารถปรับสมการ 10 เป็นสมการ 13 หรือสมการ 14

$$\Theta_{gu} = \left[\left(\frac{[(I_{rms})^2 R_{dc}] + [4 \times P_{ecw_R} \times (K - factor)]}{[(I_{rms_R})^2 R_{dc}] + [4 \times P_{ecw_R}]} \right) \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (13)$$

$$\Theta_{gu} = \left[\left(\frac{[(I_{rms})^2 R_{dc}] + [P_{ecw_H} \times (K - factor)]}{[(I_{rms_R})^2 R_{dc}] + P_{ecw_H}} \right) \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (14)$$

จากค่า K-Factor ที่ได้กล่าวไว้ของ Linden (1996) และ The Institute of Electrical and Electronics Engineers (1998)

$$K - Factor = \frac{P_{ecw}}{P_{ecw_R}} = \sum_{h=1}^{\infty} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (15)$$

ดังนั้น สามารถปรับสมการ 14 เป็นสมการ 16

$$\Theta_{gu} = \left[\frac{\left[(I_{rms})^2 R_{dc} \right] + \left[P_{ecw_H} \times \left(\frac{P_{ecw}}{P_{ecw_R}} \right) \right]}{\left[(I_{rms_R})^2 R_{dc} \right] + P_{ecw_H}} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (16)$$

เมื่อ

$$P_{ecw} = P_{LL(total)} - (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} - P_{OSL} \quad (17)$$

จากสมการ 17 ค่า P_{OSL} มีค่าน้อย สามารถละเลยได้ ดังนั้น

$$P_{ecw} = P_{LL(total)} - (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} \quad (18)$$

P_{ecw} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขดลวด, W

P_{ecw_R} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขดลวดที่พิกัด, W

P_{ecw_H} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่จุดร้อนสุด, W

P_{OSL} คือ กำลังสูญเสียปลั๊กย่อยอื่น ๆ นอกเหนือจากขดลวด, W

เมื่อรวมสมการ 5 กับสมการ 16 จะได้อุณหภูมิเพิ่มของจุดร้อนสุดและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันดังสมการ 19 และ 20 เรียงตามลำดับ

$$\Theta_{hrise} = \Theta_{ot} + \Theta_{gu} \quad (19)$$

$$\Theta_h = \Theta_{hrise} + \theta_a \quad (20)$$

Θ_{hrise} คือ อุณหภูมิเพิ่มที่จุดร้อนสูงสุดของตัวนำ, °C

กรอบแนวคิดการวิจัย

Yadav and Reddy (2018) ได้ทำการศึกษาถึงสมรรถนะของหม้อแปลงในกรณีที่หม้อแปลงติดตั้งแอกทีฟฟิวเตอร์เพื่อลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกและกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งแอกทีฟฟิวเตอร์ แต่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้มุ่งเน้นถึง

ความร้อนที่เพิ่มขึ้นในตัวหม้อแปลงสาเหตุอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้น จาก Srinivasan and Krishnan (2013) ใช้ทูลบล็อกซิมมูลิงก์ของโปรแกรมแมทแลบมาจำลองหาอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดของหม้อแปลง โดยได้พิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกับจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 100 MVA เช่น ได้นำความเร็วลมและผลกระทบของรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์มาร่วมพิจารณาด้วย จากงานวิจัยดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังไม่มีการวิจัยถึงการทำนายอุณหภูมิน้ำมัน และอุณหภูมิจุดร้อนสุด ในกรณีที่เป็นโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ชนิด 1 เฟส ซึ่งในกรณีนี้จะมีอุปกรณ์ที่ใช้งานในปัจจุบันอยู่เป็นจำนวนมาก เช่น คอมพิวเตอร์ ปริ้นเตอร์ สแกนเนอร์ เครื่องสำเนาเอกสาร บัลลัสต์อิเล็กทรอนิกส์ หลอดไฟแบบแอลอีดี ทีวี เครื่องเล่นเสียง อื่น ๆ ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้จะกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่ไหลย้อนจากขดลวดทุติยภูมิไปยังขดลวดปฐมภูมิแล้วไหลย้อนไปสู่ระบบจำหน่าย แต่ที่สำคัญคือกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ที่มีปริมาณมากนั้น ไม่สามารถไหลย้อนไปยังระบบจำหน่าย แต่จะไหลวนอยู่ในรูปของขดลวดปฐมภูมิ จากผลการวิจัยของสิริวิช ทัดสวน (Tadsuan, 2009) ยังไม่มีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มาร่วมพิจารณา และจากผลการวิจัยของประสิทธิ์ สุขเสริม และสิริวิช ทัดสวน (Sukserm & Tadsuan 2018) ได้มีการทดสอบในกรณีที่ไม่มีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มาร่วมพิจารณา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ค่าอุณหภูมิของน้ำมันและของขดลวดมีค่าสูงกว่ากรณีที่เป็นโหลดเชิงเส้นเป็นอย่างมาก ซึ่งจุดนี้เป็นจุดที่น่าสนใจศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิหม้อแปลงเป็นอย่างมาก เพราะถ้าสามารถพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าอุณหภูมิหม้อแปลงให้มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบได้ ก็สามารถป้องกันหม้อแปลงเสียหายสาเหตุอันเนื่องมาจากความร้อนเกินขีดจำกัดเมื่อมีการต่อโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น และยังรวมถึงเรื่องการวางแผนการจ่ายภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงได้เป็นอย่างดีถูกต้องอีกด้วย

สมมติฐานการวิจัย

1. โมเดลทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิหม้อแปลงที่พัฒนาขึ้น สามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับการทดสอบสาเหตุเพราะโมเดลนี้ได้นำค่าฮาร์มอนิกต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงมาร่วมพิจารณา

2. หม้อแปลงยังทำงานได้ในสภาพปกติ เมื่อมีการจ่ายกระแสคลื่นมูลฐานที่พิกัดให้กับโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ชนิด 1 เฟส (บริดจ์ เรกติไฟเออร์)

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกมีจุดประสงค์เพื่อทดสอบหาความต้านทานสมมูลของขดลวดหม้อแปลงที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ใช้งาน ส่วนขั้นตอนที่สอง เป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนแรกมาใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงว่ามีค่าแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดกับการปฏิบัติ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

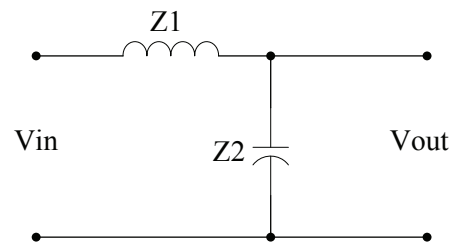
ตอนที่ 1 เป็นการทดสอบหาความต้านทานสมมูลของขดลวดหม้อแปลง ซึ่งใช้เครื่องมือต่าง ๆ ดังนี้ (1) Digital Oscilloscope ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL520 (2) Portable Three-Phase Wattmeter ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น 2042 (3) Ammeter ยี่ห้อ YEW และ (4) อินเวอร์เตอร์ชนิด 3 เฟส

ตอนที่ 2 การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลง การคำนวณ เพื่อทำนายอุณหภูมิของหม้อแปลงซึ่งใช้เครื่องมือต่าง ๆ ดังนี้ (1) Data Acquisition Module ยี่ห้อ ADAM 4018 (2) Thermocouple type K (3) Power Meter ยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX True rms F25 (4) Digital Oscilloscope ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL1640 (5) Differential probe ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P5200

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การทดสอบและผลการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่าง ๆ

กระแสไฟฟ้าสลับจะไหลที่ผิวของตัวนำ ผลมาจากปรากฏการณ์ Skin effect ทำให้ค่าความต้านทานของตัวนำในกรณีที่ใช้กระแสไฟฟ้าสลับมีค่าสูงกว่าในไฟฟ้ากระแสตรง และมีค่าแปรตามความถี่ไฟฟ้า ดังนั้น ในงานวิจัยต้องทดสอบหาค่าความต้านทานของวงจรสมมูลที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่าง ๆ ($R_{eq(ac)}$) ของลวดตัวนำ เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียรวมที่ขดลวด โดยได้ออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์และวงจรกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน ดังภาพ 2



ภาพ 2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้ต่อร่วมอินเวอร์เตอร์แบบคลื่นสี่เหลี่ยมแบบควอดซี

จากวงจรกรองความถี่ ค่าอิมพีแดนซ์ของ L และ C ดังสมการ 21-22

$$Z_1 = j\omega L \quad (21)$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C} \quad (22)$$

โดยที่ V_{in} เป็นแรงดันอินพุต ซึ่งประกอบด้วยแรงดันคลื่นมูลฐานและองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่าง ๆ ส่วน V_{out} เป็นเอาต์พุตวงจรกรองความถี่ จากภาพ 2 จะเห็นว่าวงจรกรองความถี่จะทำหน้าที่เหมือนวงจรแบ่งแรงดันที่ลดอันดับฮาร์มอนิกที่ n ตามสมการ 23-25

$$f_{(n)} = \frac{V_{out(n)}}{V_{in(n)}} \quad (23)$$

$$f_{(n)} = \frac{Z_2(n)}{Z_2(n) + Z_1(n)} \quad (24)$$

$$f_{(n)} = \frac{1}{1 + Z_{1(n)} Y_{2(n)}} \quad (25)$$

จากสมการของ $f_{(n)}$ เห็นได้ว่างจรกรองความถี่ที่ดี จะทำให้เรกกูเลชันที่ดี หรือลดแรงดันคลื่นมูลฐานเพียงเล็กน้อยหรือกล่าวได้ว่า

$$f_{(1)} = 1$$

หรือที่ขนาดเท่ากับแรงดันคลื่นมูลฐาน

$$Z_{1(n)} Y_{2(n)} = 0 \quad (26)$$

ขณะที่สามารถลดอันดับฮาร์โมนิกที่ n ได้มาก ๆ หรือ $f_{(n)} \ll 1$ ทำให้เข้าใกล้ศูนย์ เมื่อ $n > 1$

$$Z_{1(n)} Y_{2(n)} = \alpha \quad (27)$$

ดังนั้น จะใช้สมการ 25-27 ในการออกแบบเพื่อให้ได้ค่า L และ C ที่เหมาะสมและน้อยที่สุด โดยที่อินเวอร์เตอร์ยังคงมีรูปคลื่นเอาต์พุตและค่าแรงดันเรกกูเลชันที่ดี ค่า L และ C ที่ออกแบบได้แสดงดังตาราง 1 ส่วนคุณสมบัติหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตาราง 2

ตาราง 1

ค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่เลือกใช้งานในการทดสอบที่ความถี่ต่าง ๆ

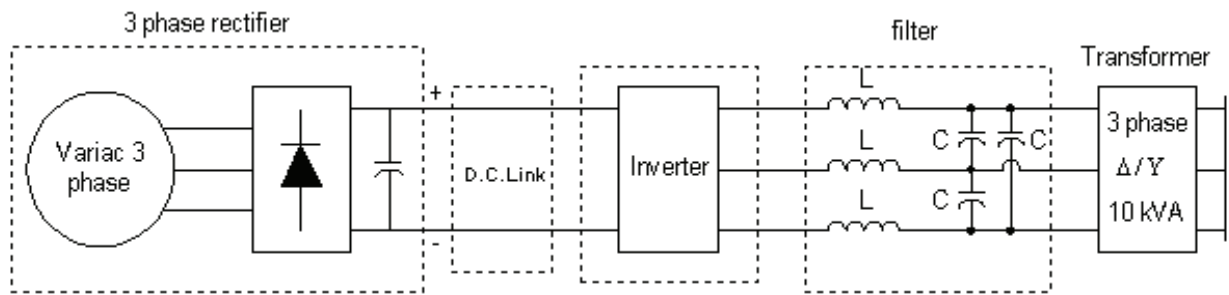
ความถี่คลื่นมูลฐาน (Hz)	L (mH)	C (μ F)
150	50	100
250	50	50
350	40	50
450	20	50
550	20	50
650	5	33.3
750	5	33.3
850	5	25
950	5	25

ตาราง 2

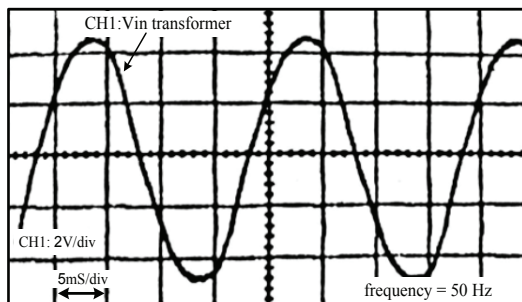
แสดงคุณสมบัติหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ใช้ทดสอบ

Maximum VA = 10 kVA		Frequency = 50 Hz	
High Volt = 380 V		Low Volt = 220 V	
Load Loss = 350 W		No Load Loss = 77 W	
Total Loss = 427 W		Vector Dyn11	
Rdc =1.457	Type ONAN	Class A	
Ω /phase			
$\Theta_{or} = 37^{\circ}\text{C}$	$\text{gr}_{\text{MAX}} = 8$	$\tau = 2.75$ hours	H = 1.1

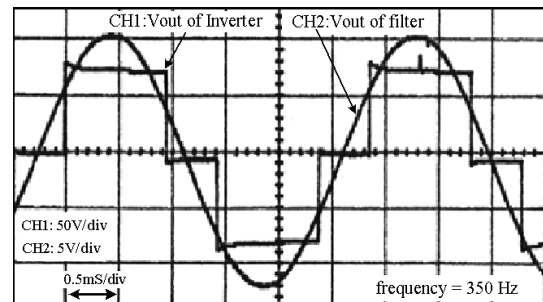
การทดสอบได้จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ เข้าไปยังหม้อแปลงทดสอบที่มีการลัดวงจรทางด้านขดลวดทุติยภูมิ บันทึกค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าและรูปสัญญาณต่าง ๆ ด้วยสโตเรจ ออสซิลโลสโคปดังภาพ 4-13 ผลที่ได้จากการทดสอบนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของลวดตัวนำต่อค่า $(I_{\text{phase}})^2$ ดังภาพ 14 เมื่อนำค่าทั้งสองไปสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการของ Least -squares ทำให้ได้สมการกำลังไฟฟ้า (P) ที่ความถี่มูลฐานต่าง ๆ ดังตาราง 3 เห็นได้ว่าค่าคงที่ที่อยู่ท้ายสมการมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพจน์ที่อยู่ข้างหน้า ทำให้สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นค่าคงที่ที่คูณกับ $(I_{\text{phase}})^2$ ก็คือค่าของ $R_{eq(ac)}$ ที่จะนำไปใช้งานต่อนั่นเอง



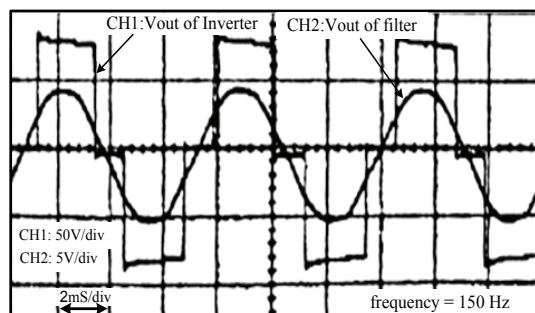
ภาพ 3 วงจรการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ



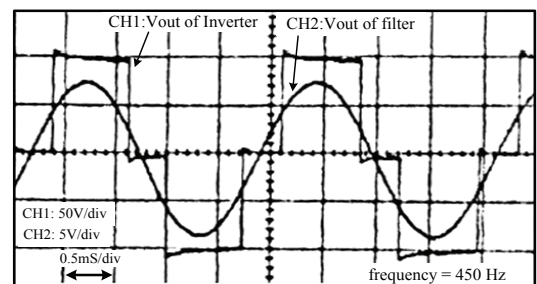
ภาพ 4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz



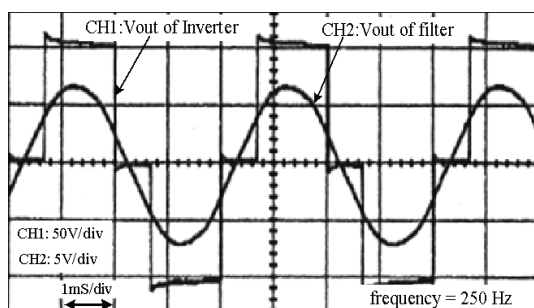
ภาพ 7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ที่ความถี่ 350 Hz



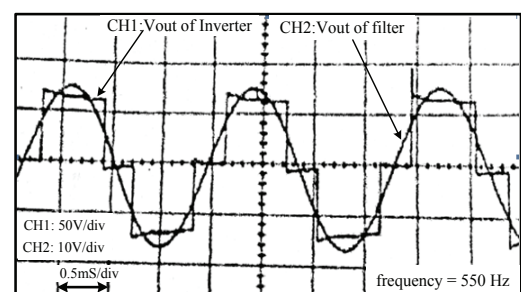
ภาพ 5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ที่ความถี่ 150 Hz



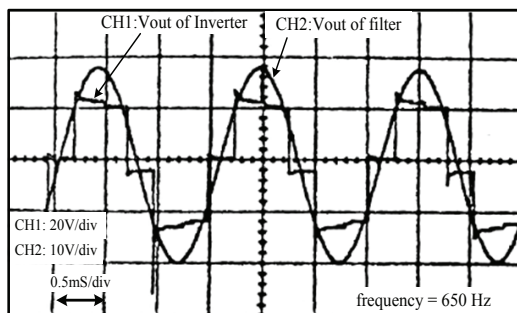
ภาพ 8 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ที่ความถี่ 450 Hz



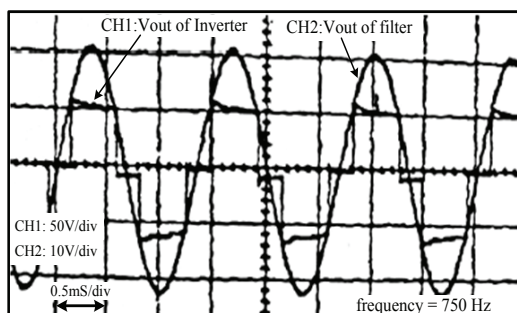
ภาพ 6 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ที่ความถี่ 250 Hz



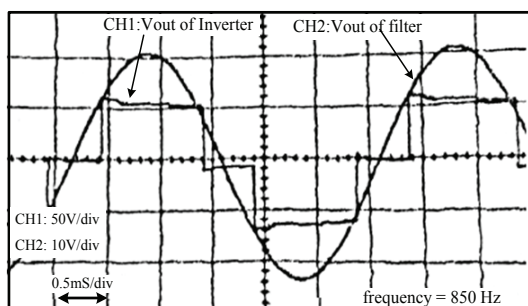
ภาพ 9 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ที่ความถี่ 550 Hz



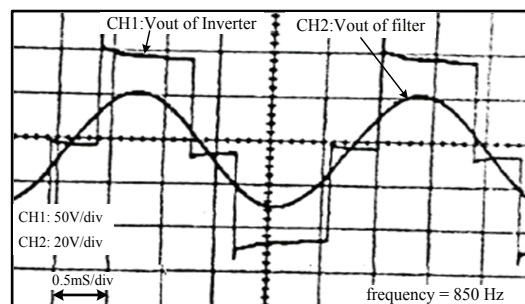
ภาพ 10 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่ความถี่ 650 Hz



ภาพ 11 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่ความถี่ 750 Hz



ภาพ 12 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่ความถี่ 850 Hz

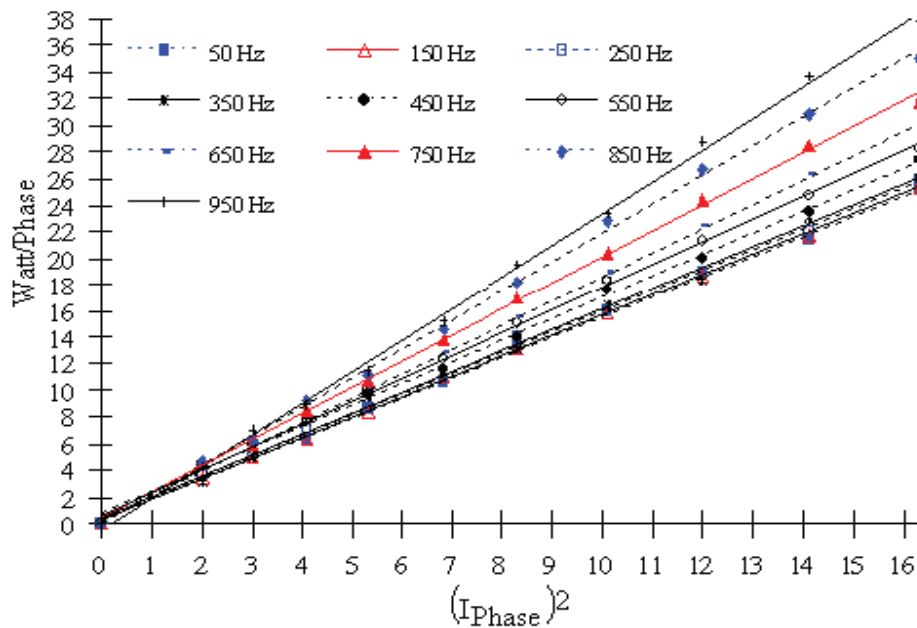


ภาพ 13 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ ที่ความถี่ 950 Hz

ตาราง 3

ผลลัพธ์จากการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียเพื่อคำนวณหาความต้านทานสมมูลที่ความถี่ต่าง ๆ

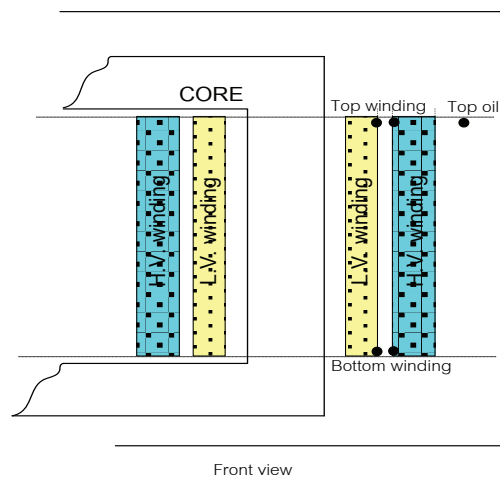
ลำดับ ฮาร์มอนิก (h)	สมการกำลัง (P) ที่ได้จากการทดสอบ	$R_{eq(ac)}$ (Ω /phase)
1 (50 Hz)	$P = 1.526 (I^2) + 0.2160$	1.526
3 (150 Hz)	$P = 1.537 (I^2) + 0.0956$	1.537
5 (250 Hz)	$P = 1.553 (I^2) + 0.2802$	1.553
7 (350 Hz)	$P = 1.574 (I^2) + 0.2871$	1.574
9 (450 Hz)	$P = 1.617 (I^2) + 0.7310$	1.617
11 (550 Hz)	$P = 1.726 (I^2) + 0.3756$	1.726
13 (650 Hz)	$P = 1.825 (I^2) + 0.1786$	1.825
15 (750 Hz)	$P = 1.969 (I^2) + 0.2096$	1.969
17 (850 Hz)	$P = 2.182 (I^2) - 0.1839$	2.182
19 (950 Hz)	$P = 2.380 (I^2) - 0.7097$	2.380



ภาพ 14 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ที่ความถี่ 250 Hz

2. การทดสอบและผลการทดสอบแรงดัน กระแส และอุณหภูมิหม้อแปลง

ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตามตำแหน่งต่าง ๆ ร่วมกับ Data Acquisition Module ยี่ห้อ ADAM รุ่น 4018 ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิซึ่งเป็นขดลวดแรงดันสูง ที่ขดลวดทุติยภูมิซึ่งเป็นขดลวดแรงดันต่ำทั้งด้านบนและด้านล่าง และที่บริเวณน้ำมันด้านบนที่ระดับความสูงเดียวกับขดลวดด้านบนดังภาพ 15 ภาพจริงดังภาพ 16 และวัดอุณหภูมิแวดล้อมดังภาพ 17



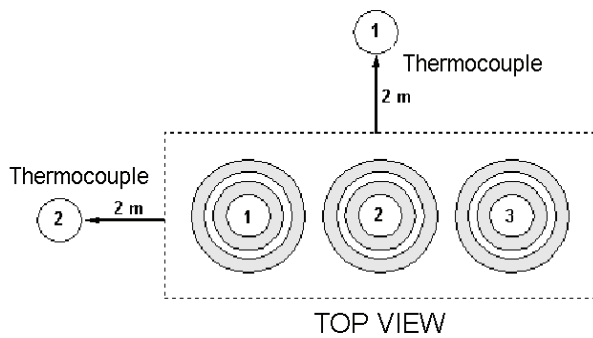
ภาพ 15 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน

ต่อวงจรการทดลองดังภาพ 18 จ่ายแรงดันที่พิกัดหม้อแปลง 380 V ปรับโหลดให้มีกระแสโหลดที่เป็นคลื่นมูลฐานที่พิกัดหม้อแปลง 15.19A (ในทางปฏิบัติอาจได้ค่าที่ใกล้เคียง)

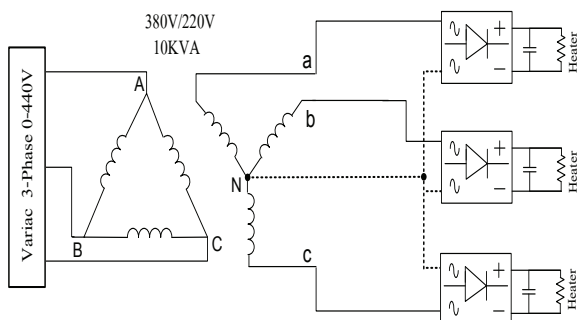
บันทึกค่ากระแส แรงดันต่าง ๆ และพารามิเตอร์อื่น ๆ ด้วยเพาเวอร์มิเตอร์ ยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX รุ่น True rms F25 และวัดรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ด้วย Digital Oscilloscope ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL1640 สัญญาณและสเปกตรัมต่าง ๆ ในการทดสอบได้ทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง โดยค่าเฉลี่ยดังภาพ 19 ถึงภาพ 26 และอุณหภูมิหม้อแปลงได้ทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ค่าเฉลี่ย ดังภาพ 27 และ 28



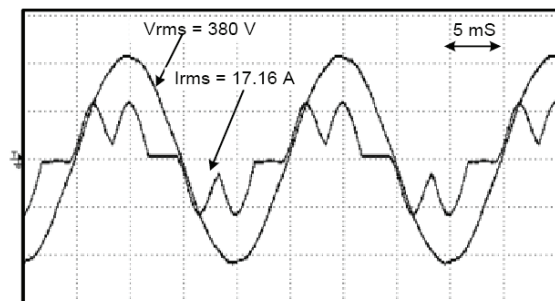
ภาพ 16 ภาพจริงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ



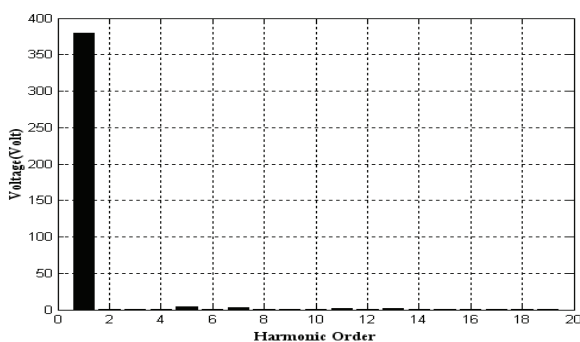
ภาพ 17 การวัดอุณหภูมิแวดล้อมรอบ ๆ หม้อแปลงที่ทดสอบ จำนวน 2 ตำแหน่ง



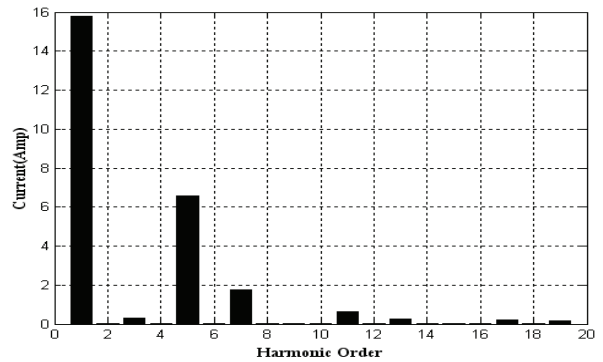
ภาพ 18 วงจรการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง โดยใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 1 เฟส



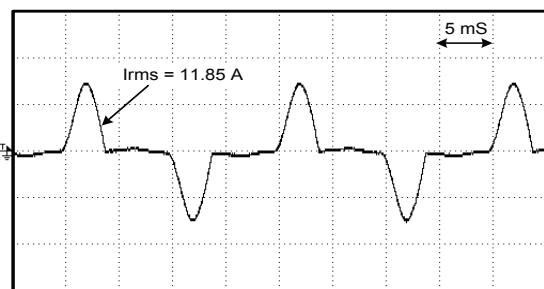
ภาพ 19 สัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดปฐมภูมิ



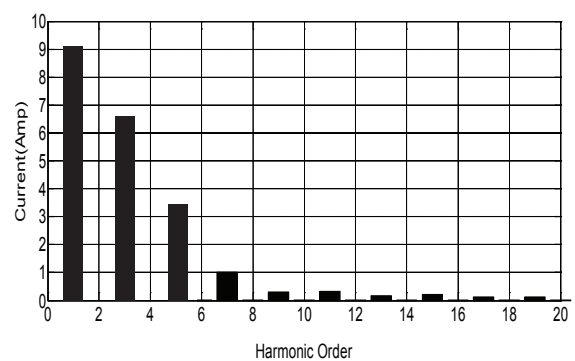
ภาพ 20 สเปกตร้าแรงดันของขดลวดปฐมภูมิ



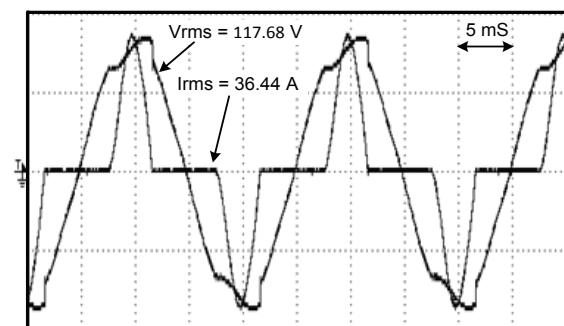
ภาพ 21 สเปกตร้ากระแสเส้นขดลวดปฐมภูมิ



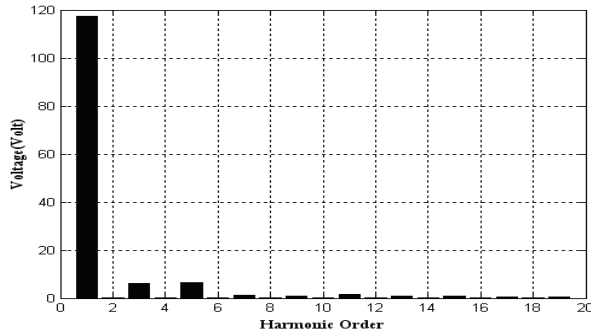
ภาพ 22 กระแสเฟสที่ไหลวนอยู่ในรูปเดลต้าขดลวดปฐมภูมิ



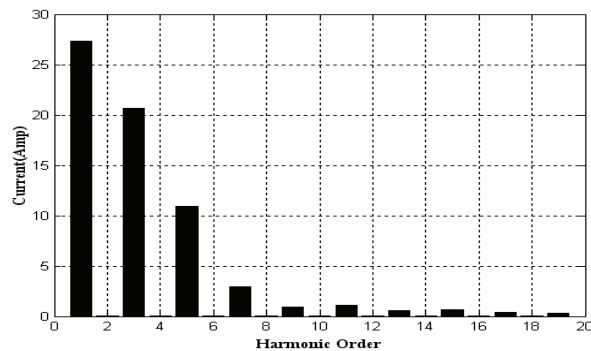
ภาพ 23 สเปกตร้ากระแสเฟสในรูปเดลต้าขดลวดปฐมภูมิ



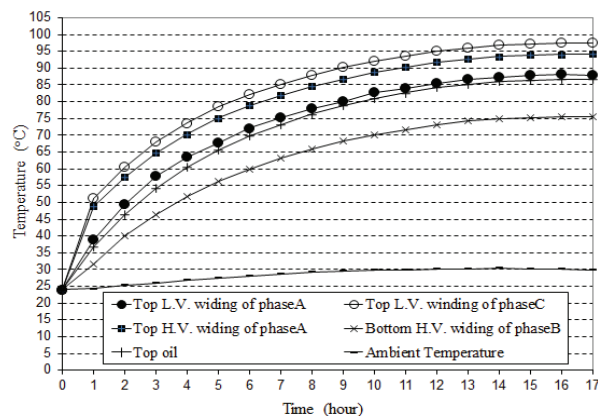
ภาพ 24 สัญญาณกระแสและแรงดันขดลวดทุติยภูมิ



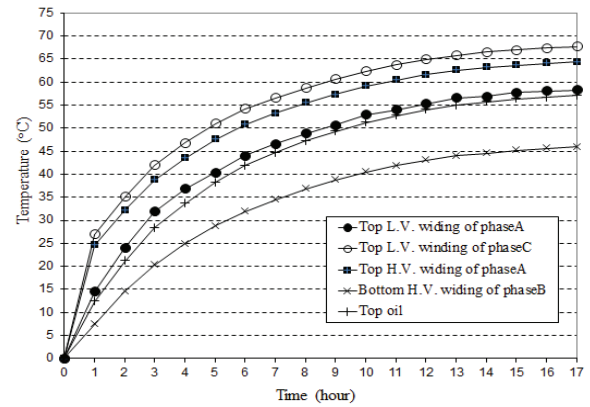
ภาพ 25 สเปกตร้าแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิ



ภาพ 26 สเปกตร้ากระแสที่ขดลวดทุติยภูมิ



ภาพ 27 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของหม้อแปลงทดสอบ



ภาพ 28 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มเติมที่จุดต่าง ๆ ของหม้อแปลงทดสอบ

การอภิปรายผล

จากภาพ 19 เห็นได้ว่าเป็นสัญญาณแรงดันที่พิกัดที่ชั่วขณะของหม้อแปลงเป็นรูปคลื่นซายน์ ค่าที่อ่านได้จากเพาเวอร์มิเตอร์มีสเปกตร้าดังภาพ 20 แสดงให้เห็นว่ามีเฉพาะค่าแรงดันสเปกตร้าคลื่นมูลฐานเท่านั้น ส่วนแรงดันฮาร์โมนิกที่ประปรายมีปริมาณน้อย

ส่วนคลื่นกระแสไลน์ของหม้อแปลง เห็นได้ว่าเป็นคลื่นที่ผิดเพี้ยนจากสัญญาณซายน์เป็นอย่างมากจะมีสเปกตร้าดังภาพ 21 เห็นได้ว่ามีสเปกตร้ากระแสคลื่นมูลฐานและกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ $6K \pm 1$ (5, 7, 11, 13, 17, 19) มีปริมาณมากลดหลั่นลงมาจากลำดับ

ภาพ 22 เป็นสัญญาณกระแสเฟส ที่ไหลวนอยู่ในรูปเดลต้าของขดลวดปฐมภูมิ มีสเปกตร้าดัง ภาพ 23 ค่าสเปกตร้ากระแสคลื่นมูลฐานและกระแสฮาร์โมนิกลำดับเลขคี่มีปริมาณมากและลดหลั่นลงมาจากลำดับ โดยที่กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ไหลอยู่ในรูปเดลต้ารวมด้วยและไม่ไหลออกจากรูปเดลต้า

ดังนั้น ในการคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงจะนำค่ากระแสต่าง ๆ ในรูปเดลต้านี้ไปใช้ในการคำนวณทำนายอุณหภูมิหม้อแปลง

ภาพ 24 เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดที่ชั่วขณะของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิเป็นรูปคลื่นซายน์ที่มีความผิดเพี้ยนโดยมีสเปกตร้าดังภาพ 25 เห็นว่ามีค่าสเปกตร้าแรงดันคลื่นมูลฐานและคลื่นแรงดัน ฮาร์โมนิกที่ 3 และที่ 5 รวมด้วยปริมาณมาก

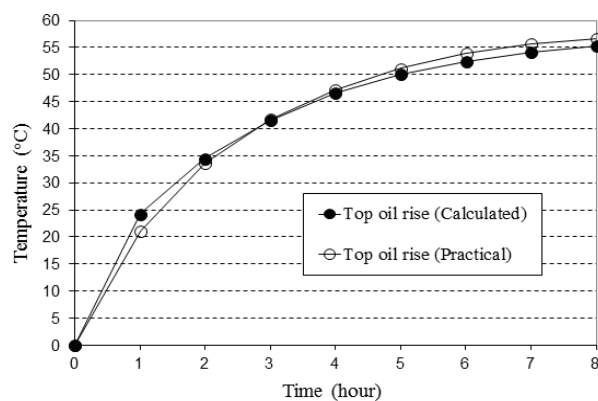
ส่วนกระแสไลน์ ของหม้อแปลงทางด้านทุติยภูมิ เป็นคลื่นที่ผิดเพี้ยนจากสัญญาณขาเข้าเป็นอย่างมาก จะมีสเปกตรัมกระแสดังภาพ 26 โดยที่สเปกตรัมกระแสคลื่นมูลฐานและกระแส ฮาร์โมนิกเลขคี่มีปริมาณมากลดหลั่นลงตามลำดับ

ดังนั้น ในการคำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลง จะนำค่ากระแสต่าง ๆ ทางด้านทุติยภูมินี้ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิหม้อแปลงหรืออาจจะโอนย้ายไปด้านปฐมภูมิเพื่อใช้ในการคำนวณทำนายได้อีกเช่นเดียวกัน (มีค่าใกล้เคียงกับใช้กระแสในรูปเดลต้า)

ภาพ 27 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มเติมที่จุดต่าง ๆ ของหม้อแปลง รวมถึงอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยที่ติดตั้งตัวเทอร์โมคัปเปิลห่างจากตัวหม้อแปลงระยะ 2 เมตร ที่ระดับความสูงครึ่งหนึ่งของหม้อแปลง เห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (แรงดันต่ำ) ที่อยู่บริเวณด้านบนของเฟส C มีค่าสูงสุด 97.42°C ยังไม่เกินขีดจำกัดที่ 140°C (International Electrotechnical Commission, 1991) ส่วนอุณหภูมิที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (แรงดันสูง) ที่อยู่บริเวณด้านล่างของเฟส A มีค่าต่ำสุดที่ 75.62°C สาเหตุเพราะการระบายความร้อนโดยอาศัยการไหลของของเหลว ความร้อนจะลอยตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน ทำให้บริเวณด้านล่างมีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านบน ถ้าพิจารณาในส่วนของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่ออกแบบให้ขดลวดคล้องรอบแกนเหล็กที่ระดับความสูงด้านบนเท่า ๆ กันนั้น ที่ขดลวดทุติยภูมิจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิขดลวดปฐมภูมิ สาเหตุเพราะการระบายความร้อนของขดลวดที่อยู่ชั้นในจะทำได้ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับขดลวดปฐมภูมิที่อยู่ชั้นนอก ส่วนอุณหภูมิน้ำมันด้านบน 87.76°C ซึ่งมีค่าไม่เกินขีดจำกัดที่ 105°C (International Electrotechnical Commission, 1991)

ภาพ 28 เป็นผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม (เป็นค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากจุดต่าง ๆ ไปด้วยอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยที่วัดได้ในเวลาเดียวกัน) การหาอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดโดยนำค่าอุณหภูมิขดลวดที่บริเวณขดลวดด้านบนที่ 67.73°C และด้านล่างที่ 45.93°C รวมกันหารด้วยสองมีค่า 56.83°C ซึ่งไม่เกินขีดจำกัดที่ 65°C (American National Standard Institute, 1981)

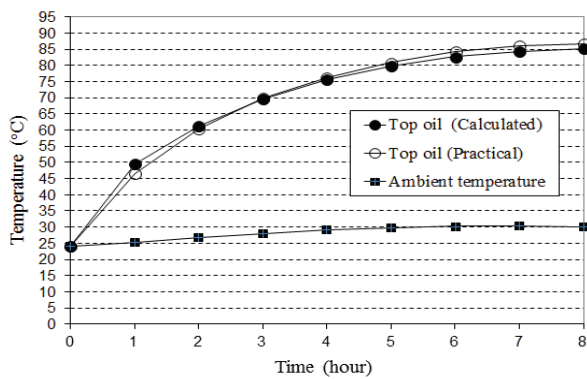
ภาพ 29 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนจากการทดสอบและการทำนาย เห็นได้ว่าตลอดช่วงของการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย 8 ชั่วโมง 1.32°C และมีค่าร้อยละผิดพลาดสัมพัทธ์ 3.72



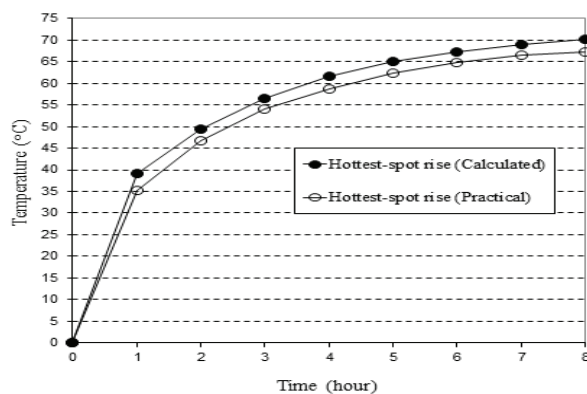
ภาพ 29 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนจากการทดสอบและการทำนาย

ภาพ 30 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนจากการทดสอบและการทำนาย เห็นได้ว่าตลอดช่วงของการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ยตลอด 8 ชั่วโมง 1.32°C และมีค่าร้อยละผิดพลาดสัมพัทธ์ 2.00 สาเหตุหนึ่งในการเกิดค่าผิดพลาดมาจากการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ไม่ได้สัมผัสที่ผิวลวดตัวนำโดยตรง แต่จะนำแผ่นฉนวนไม่ลามาค้นเพื่อป้องกันการลัดวงจรจากลวดตัวนำสู่เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพ 31 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของขดลวดจากการทดสอบและการทำนาย เห็นได้ว่าตลอดช่วงของการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ยตลอด 8 ชั่วโมง 2.78°C และมีค่าร้อยละผิดพลาดสัมพัทธ์ 5.28 สาเหตุหนึ่งในการเกิดค่าผิดพลาดมาจากการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ไม่ได้สัมผัสที่ผิวลวดตัวนำโดยตรง แต่จะนำแผ่นฉนวนไม่ลามาค้นเพื่อป้องกันการลัดวงจรจากลวดตัวนำสู่เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

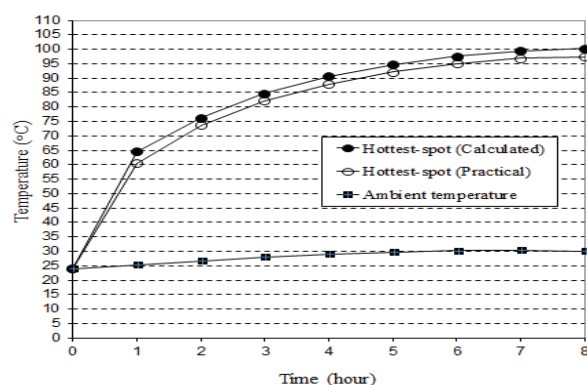


ภาพ 30 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนจากการทดสอบและการทำนาย



ภาพ 31 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของขดลวดจากการทดสอบและการทำนาย

ภาพ 32 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของขดลวดจากการทดสอบและการทำนาย เห็นได้ว่าตลอดช่วงของการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย 8 ชั่วโมง 2.78°C และมีค่าร้อยละผิดพลาดสัมพัทธ์ 3.41



ภาพ 31 การเปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดจากการทดสอบและการทำนาย

จากจุดประสงค์ที่ตั้งไว้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาที่จุดต่อร่วมของหม้อแปลงกับระบบ (PCC) มีกระแสประสิทธิผลทางด้านขดปฐมภูมิ 17.16A กระแสฮาร์โมนิกรวม 6.98A $\% \text{THD}_i = 44.18$ โดยมีขนาดของกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับไม่เกินจากข้อกำหนด Energy Networks Association (1976) และค่า $\% \text{THD}_v$ มีค่า 1.94 ไม่เกินจากข้อกำหนด Energy Networks Association (1976) เช่นเดียวกัน

อุณหภูมิหม้อแปลงที่ตำแหน่งขดลวดด้านบนเป็นจุดที่มีค่าสูงสุด ส่วนที่บริเวณด้านล่างจะมีค่าต่ำสุดและบริเวณที่น้ำมันหม้อแปลงหมุนเวียนไม่สะดวกจะเป็นจุดเสี่ยงที่ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงได้ ซึ่งจะส่งผลเสียกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่ลดลง ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลง ถ้าคำนึงถึงเรื่องการระบายความร้อนของหม้อแปลงให้เหมาะสม ก็จะช่วยยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้เป็นอย่างดี

จากการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นทำนายค่าอุณหภูมิหม้อแปลงได้อย่างใกล้เคียงกับการทดสอบ จะส่งผลดีกับการวางแผนการจ่ายโหลดของหม้อแปลง เพื่อป้องกันหม้อแปลงเสียหายเนื่องจากความร้อนเกินได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

ข้อเสนอแนะการวิจัย

หม้อแปลงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหม้อแปลงทดสอบใช้งานกับแรงดันต่ำ (380V/220V) จุดประสงค์เพื่อให้สามารถติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับผิวของลวดทองแดง โดยมีฉนวนแผ่นบาง ๆ กันไว้ ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดอันตรายกับการเกิดเบรคดาวน์ของฉนวนในขณะทำการทดสอบ แต่ถ้าทดสอบกับหม้อแปลงที่มีระดับแรงดันสูง จะต้องใช้วิธีอื่นแทน เช่น ใช้ไฟเบอร์ ออปติกในการวัดบริเวณที่เป็นขดลวดแรงดันสูง

ในการประเมินค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดนี้ยังสามารถหาได้จากเรื่องการส่งผ่านความร้อน (การนำ การพา และการแผ่รังสี) โดยส่วนมากแล้ว หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันการพาจะมีอิทธิพลกับการระบายความร้อนมากกว่าวิธีอื่น ๆ Ankireddypalli and Vijaykumar

(2008) ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางความร้อน โดยนำไปทำนายหาอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน จุดที่น่าสนใจคือ ถ้าได้มีการนำไปเปรียบเทียบกับ

ผลการทดสอบจริงแล้วมีค่าที่ยอมรับได้ ก็จะเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการป้องกันหม้อแปลงมีความร้อนสูงเกินไปได้อย่างดี



References

- American National Standard Institute. (1981). *General requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers*. Retrieved from <http://studylib.net/doc/18035561/ieee-standard-general-requirements-for-liquid>
- Energy Networks Association. (1976). *Engineering recommendation g5/5 harmonic voltage distortion and the connection of non-linear and resonant plant and equipment to transmission systems and distribution networks in the United Kingdom*. Retrieved from https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/39047-Engineering%20Recommendation%20G5_5%20Draft%20January%202015.pdf
- International Electrotechnical Commission. (1991). *IEC 60354: Loading guide for oil-immersed power transformer*. Retrieved from <https://www.scribd.com/document/323419665/IEC-60354-Ed-2-0-1991-09-Loading-guide-for-oil-immersed-power-transformers-pdf>
- Linden, W. P. (1992). An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 7(3), 1347-1357.
- Linden, W. P. (1994). Predicting liquid filled transformer loading capability. *IEEE Transactions on Industry Application*, 30(1), 170-178.
- Linden, W. P. (1996). Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents. *IEEE Transactions on Industry Application*, 32(3), 633-645.
- Pradhan, M. K., & Ramu, T. S. (2003). Prediction of hottest spot temperature (HST) in power and station transformers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 18(4).4, 1275-1283.
- Reddy, A. S., & Vijaykumar, M. (2008). Hottest spot and life evaluation of power transformer design using finite element method. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 4(3), 238-243.
- Srinivasan, M., & Krishnan, A. (2013) Effects of environmental factors in transformer's insulation life. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 8(1), 35-44.
- Sukserm, P., & Tadsuan, S. (2018). Comparison of testing results of oil-immersed Transformer under linear load and non-linear load conditions. *SAU Journal of Science & Technology*, 4(1), 1-21. (in Thai)

- Susa, D., & Nordman, H. (2009). A simple model for calculating transformer hot-spot temperature. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 24(3), 1257-1264.
- Tadsuan, S., Kinnares, V., Kritsanajinda, N., Banjongjit, S., & Suechoey, B. (2000). Testing of temperature at conductor and oil of Mineral-Oil_Immersed Transformer in order to be the criterion for transformer design. *KMUTT Research and Development Journal*, 23(2), 59-77. (in Thai)
- Tadsuan, S., Patcharatakul, T., Dhammaprasit, T., Suechoey, B., & Tangsiriworakul, C. (2004). Estimation of core loss of M4 and M5 transformer core material under sinusoidal and non-sinusoidal voltage excitation. *KMUTT Research and Development Journal*, 27(1), 18-33. (in Thai)
- Tadsuan, S., (2009). Testing and planning of load of oil-immersed transformer when non-linear load condition in Bangkok and surrounding area. *KMUTT Research and Development Journal*, 32(2), 38-59. (in Thai)
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1998). *IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying non-sinusoidal load currents*. Retrieved from www.pgtech.co.kr/nboard/n_bbs_sql.php?mode=mdown&no=216
- Yadav, M., & Reddy, S. (2018). Performance study of transformers under non-linear load conditions without and with active filter. *International Journal of Electrical Engineering & Technology*, 9(2), 115-122.

