

การทดสอบอุณหภูมิ ณ บริเวณลวดตัวนำ และบริเวณน้ำมัน ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน เพื่อนำเป็นค่าบรรทัดฐานของการออกแบบหม้อแปลง

สิริวิช ทัดสวน¹ วิจิตร กิณเรศ² นิทัศน์ กฤษณะจินดา³ ศุภี บรรจงจิตร⁴

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

บุญเลิศ สือเฉย²

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพฯ 10160

บทคัดย่อ

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันนั้น ควรคำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนลวดตัวนำและน้ำมัน ทั้งนี้เพราะเมื่อหม้อแปลงจ่ายกระแสไฟฟ้าในสภาวะปกติหรือสภาวะโหลดเกิน อุณหภูมิ ณ บริเวณดังกล่าวจะมีความร้อนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งถ้าได้คำนึงถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนลวดตัวนำและน้ำมัน ในการออกแบบจะทำให้ได้หม้อแปลงที่คุ้มค่างบราคา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอุณหภูมิที่ลวดตัวนำด้านปฐมภูมิ ทูติยภูมิและตำแหน่งน้ำมัน โดยทดสอบที่บริเวณระดับความสูงต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ซึ่งใช้วิธีการทดสอบแบบลัดวงจรทางด้านขดลวดทุติยภูมิแล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าสูญเสียรวมเปรียบเทียบกับ การทดสอบโดยใช้โหลดจริง ถ้าผลลัพธ์จากการทดสอบที่ได้ทั้ง 2 วิธีมีค่าเท่ากัน ก็จะเป็นผลดีกับการทดสอบหม้อแปลงขนาดใหญ่ๆ ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดหาภาระไฟฟ้าและประหยัดพลังงานได้มาก นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์จำเพาะและความสัมพันธ์ของความร้อน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหม้อแปลง ซึ่งมีประโยชน์ทางการออกแบบ การป้องกันอุณหภูมิเกิน การทำนายอุณหภูมิ การกำหนดภาระไฟฟ้า และอื่นๆ เพื่อสามารถใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะออกแบบสร้างในตัวเองๆ ไป

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

⁴ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

Testing of Temperature at Conductor and Oil of Mineral-Oil-Immersed Transformer in order to be the Criterion for Transformer Design

Siriwich Tadsuan¹ Vijit Kinnares² Nitad Kritsanajinda³ Sulee Banjongjit⁴

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

Boonlert Suechoey²

South-East Asia University, Bangkok 10160

Abstract

The design of transformer should be paid on the consideration of temperature at conductor and oil because when the transformer is in normal state or overload, the temperatures at these areas are not equal. So, the consideration at conductor and oil for designing will enhance a reasonable cost transformer.

This paper proposes temperature testing of conductor at high voltage part, low voltage part and oil. Temperature testing is operated at any level of oil-immersed transformer. This testing includes short circuit test at secondary part, then generates current with total loss in order to compare with real load testing. If both testings are relevant, it is useful for the test of large KVA transformer because the cost of providing load and electrical energy will be reduced. The specific parameter and relations among heat at any location and are useful for design, protection of over temperature, prediction of temperature, determination load for transformer shall be known and advised to be the criterion for designing the successive transformer.

¹ Graduate Student, Department of Electrical Engineering.

² Lecturer, Department of Electrical Engineering.

³ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering.

⁴ Associate Professor, Department of Electrical Engineering.

บทนำ

บางครั้งผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าอาจจะต้องการตรวจสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงที่ออกแบบสร้าง โดยปกติทั่วๆ ไปนั้นจะทำการทดสอบค่าอุณหภูมิเพิ่ม (temperature rise) ของหม้อแปลงโดยหม้อแปลงเป็นแบบแช่น้ำมัน (ONAN) ซึ่งวัดอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและครึ่งระบายความร้อนเท่านั้น [3] โดยมีได้ตรวจสอบที่ตำแหน่งต่างๆ ของขดลวดแรงดันสูง แรงดันต่ำหรือที่น้ำมันในระดับต่างๆ ซึ่งการทดสอบลักษณะนี้จะไม่สามารถทำให้ทราบค่าอุณหภูมิ ณ จุดอื่นๆ ได้ ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลตรวจสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงที่ตำแหน่งต่างๆ ที่บริเวณด้านล่าง ตรงกลาง ด้านบน และอื่นๆ ของหม้อแปลง โดยจัดสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันขนาด 10 kVA, 380V/220V, 3 เฟส, D/Y ที่มีการระบายความร้อนแบบ ONAN อย่างไรก็ตามหม้อแปลงที่นำมาทดสอบในการศึกษาครั้งนี้เป็นหม้อแปลงขนาดเล็กๆ แต่จะสะดวกในการจัดหาโหลดมาทดสอบและป้องกันอันตรายอันเนื่องมาจากระดับแรงดันไฟฟ้า การทดสอบใช้หลักการ 2 แบบ คือแบบที่ 1 ใช้วิธีการลัดวงจร (ทดสอบที่ค่าสูญเสียรวม) [3] และแบบที่ 2 ใช้โหลดจริงโดยจ่ายโหลดที่พิกัดหม้อแปลง ซึ่งผลลัพธ์ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์จำเพาะของหม้อแปลง ความสัมพันธ์ของความร้อนในหม้อแปลงและตำแหน่งจุดที่ร้อนที่สุดในหม้อแปลง ตลอดจนความแตกต่างของอุณหภูมิของการทดสอบของทั้งสองหลักการซึ่งถ้าผลลัพธ์ต่างๆ จากการทดสอบหลักการทั้งสองนี้มีค่าใกล้เคียงกันจะเป็นผลดีกับการทดสอบหม้อแปลงขนาด (kVA) ใหญ่ๆ ในอันที่จะไม่จำเป็นต้องจัดหาภาระไฟฟ้าที่มีขนาดหลายๆ มารองรับกับขนาดของหม้อแปลง

ทฤษฎี

ในการออกแบบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า สิ่งหนึ่งที่จะนำมาพิจารณาร่วมด้วย คือค่าพารามิเตอร์จำเพาะของหม้อแปลง ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการกำหนดอายุการใช้งานของหม้อแปลง หรือค่ากำลังสูญเสีย [1],[2] ค่าพารามิเตอร์จำเพาะที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด

โดยปกติวิธีการหาอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดนั้น ผู้ผลิตจะทำการทดสอบตามวิธีการที่ 1 โดยลัดวงจรทางขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง แต่การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบตามวิธีการที่ 2 เข้าไปด้วย ซึ่งเป็นการใช้โหลดจริงเข้าร่วมทดสอบ

วิธีการที่ 1 ได้ทำการจ่ายแรงดันเข้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิที่ค่าสูญเสียรวมของหม้อแปลง[3] และทำการวัดอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่บนน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิแวดล้อม 2 ถึง 3 ตำแหน่ง ทำการบันทึกค่าของอุณหภูมิที่ทุกๆ ตำแหน่งทุกๆ ชั่วโมง จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่วัดได้มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 1 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการลดแรงดันไฟฟ้า จนกระแสไฟฟ้าลดลงอยู่ที่ค่าสูญเสียขณะมีโหลด (on load) ที่พิกัด จากนั้นตัดแหล่งจ่ายไฟออกแล้วทำการวัดค่าความต้านทานที่จุดต่อของหม้อแปลงเทียบกับเวลาทั้งด้านขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิทันที

วิธีการที่ 2 ใช้โพลต์จริง (ลวดความร้อนและหลอดไฟฟ้าแบบอินแคนเดสเซนต์) ต่อทางด้านทุติยภูมิ จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่พิกัดและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่พิกัดของหม้อแปลง แล้วทำการวัดอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน (เหมือนวิธีการที่ 1)

จากค่าความต้านทานที่ได้ในแต่ละช่วงเวลาของทั้ง 2 วิธี นำมาเขียนกราฟเพื่อหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า (R_{t2}) ซึ่งหลักการเขียนกราฟแสดงในรูปที่ 1 แล้วนำค่าความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้านี้ไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด (average winding temperature) [1]-[3] สมการของการพิจารณาอุณหภูมิประกอบด้วย

$$\Theta_{w2} = \frac{R_{t2}}{R_{t1}} (k + \Theta_{w1}) - k \quad (1)$$

โดยที่

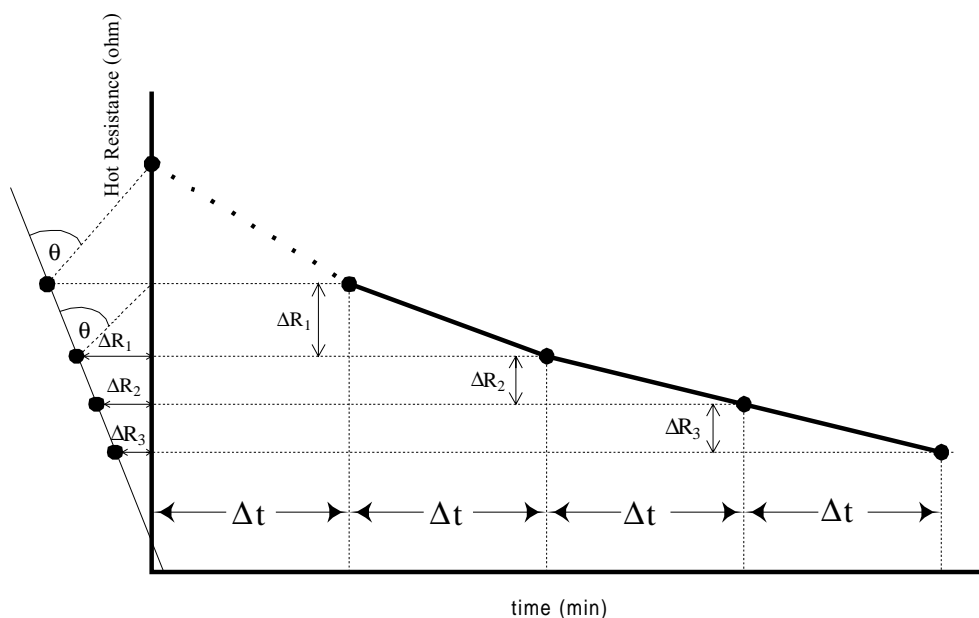
Q_{w1} คือค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เวลาก่อนเริ่มทดสอบ (t_1), °C

Q_{w2} คือค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่เวลาตัดกระแสไฟฟ้า (t_2), °C

R_{t1} คือค่าความต้านทานของขดลวดที่ได้จากการวัดที่เวลาก่อนเริ่มทดสอบ (t_1), W

R_{t2} คือค่าความต้านทานของขดลวดที่ เวลาตัดกระแสไฟฟ้า (t_2), W

k คือค่าคงที่ สำหรับทองแดง = 234.5, อลูมิเนียม = 225



รูปที่ 1 การเขียนกราฟหาค่าความต้านทานของลวดตัวนำ ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า

$$\Theta_{wr} = \Theta_{w2} - \Theta_a \quad (2)$$

โดยที่

Q_{wr} คืออุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวดที่มากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่พิกัดโหลด, °C

Q_a คืออุณหภูมิแวดล้อม, °C

2. อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด (Θ_{or}), °C [1]-[3]

$$\Theta_{or} = \text{Top oil temp} - \Theta_a \quad (3)$$

3. ค่าอุณหภูมิเพิ่มแตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดที่พิกัดโหลด (g_r), °C [2],[3]

$$g_r = \Theta_{wr} - \Theta_{imr} \quad (4)$$

$$\Theta_{imr} = \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} \quad (5)$$

โดยที่

Q_{imr} คือค่าอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของน้ำมัน, °C

Θ_{ir} คือค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่ระดับเดียวกับขดลวดด้านบน, °C

Q_{br} คือค่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านล่าง, °C

4. อัตราส่วนค่าสูญเสียโหลดที่พิกัดต่อค่าสูญเสียไร้ภาระ (R) [1],[2]

$$R = \frac{\text{Onload loss}}{\text{Noload loss}} \quad (6)$$

5. ค่าเวลาความร้อนของน้ำมันคงตัว (τ) [1]

$$\tau = \tau_0 \frac{\left(\frac{\Theta_{ou}}{\Theta_{or}}\right) - \left(\frac{\Theta_{oi}}{\Theta_{or}}\right)}{\left(\frac{\Theta_{ou}}{\Theta_{or}}\right)^{1/x} - \left(\frac{\Theta_{oi}}{\Theta_{or}}\right)^{1/x}} \quad (7)$$

โดยที่

τ คือค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัว, ชั่วโมง

τ_0 คือค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัวที่พิกัดโหลดหม้อแปลง โดยพิจารณาที่อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นของน้ำมันด้านบนที่มีค่าที่ 0 °C, ชั่วโมง

Θ_{oi} คือค่าอุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นของน้ำมันด้านบนช่วงระหว่างเวลาเริ่มต้น, $^{\circ}\text{C}$

Θ_{ou} คือค่าอุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายของน้ำมันด้านบน ที่ทุกๆ โหลด, $^{\circ}\text{C}$

x คือค่ากำลังยกที่ เมื่อเป็นหม้อแปลงชนิด ONAN = 0.8

โดยปกติค่า τ กับ t_0 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถประมาณให้เท่ากันได้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อต้องการหาค่า t_0 จะพิจารณาที่ช่วงเวลาที่ร้อยละ 63 ของอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิจุดเริ่มต้นที่ 0°C

6. ค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ [2]

6.1 ที่สภาวะคงตัว

$$\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x \quad (8)$$

$$\Theta_h = \Theta_a + \Theta_{or} \left[\frac{1+RK^2}{1+R} \right]^x + H_{gr} \cdot K^y \quad (9)$$

6.2 ที่สภาวะชั่วขณะ

$$\Theta_{ot} = \Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (10)$$

$$\Theta_h = \Theta_a + \left[\Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] + H_{gr} \cdot K^y \quad (11)$$

โดยที่

Θ_{ot} คือค่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆในสภาวะชั่วขณะ, $^{\circ}\text{C}$

Θ_h คือค่าอุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของตัวนำ, $^{\circ}\text{C}$

K คือค่าอัตราส่วนของพิกัดโหลดขณะใช้งานต่อพิกัดโหลดหม้อแปลง

y คือค่ากำลังยกที่ เมื่อหม้อแปลงชนิด ONAN = 1.6

H คือค่าตัวประกอบอุณหภูมิจุดร้อนสุด เมื่อเป็นหม้อแปลงชนิด ONAN = 1.1

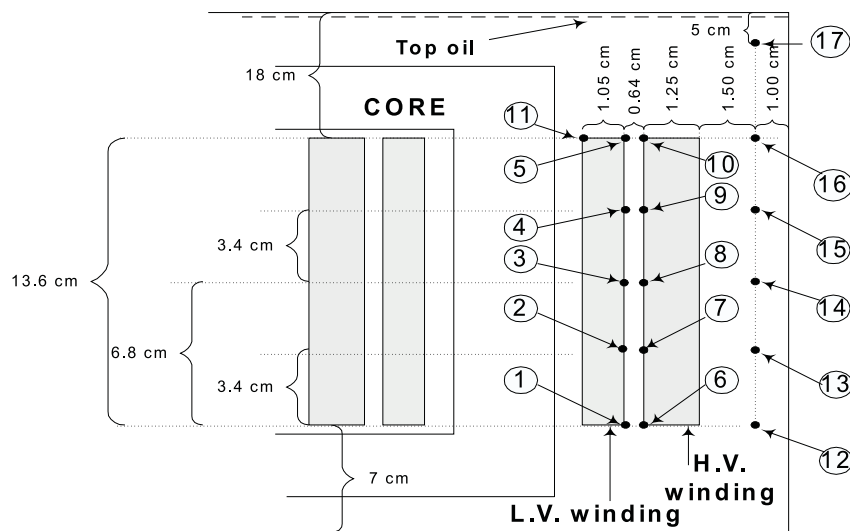
การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ขั้นตอนการทดลองและผลการทดลอง

ในการทดสอบหาค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันนั้น จะใช้หม้อแปลงที่มีคุณสมบัติตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ลักษณะการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่างๆ ในหม้อแปลงได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 และทดสอบตามหัวข้อ 2.1 โดยการวัดอุณหภูมิใช้เครื่องมือแสดงผลอุณหภูมิจี่ห้อ DIGICON รุ่น ID-7 ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

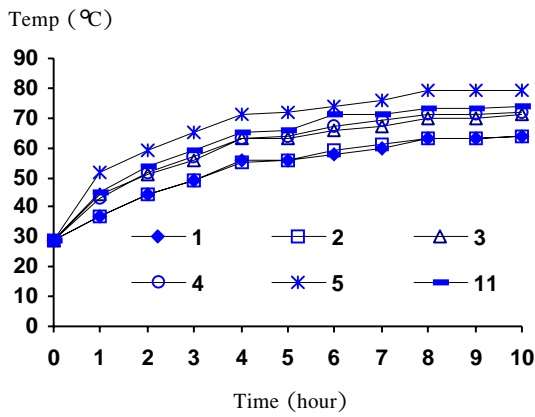
ตารางที่ 1 ข้อมูลของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน

Maximum VA = 10 kVA	Frequency = 50 Hz
Vector Dyn11	Class A
High Volt = 380 V	Type ONAN
Low Volt = 220 V	No Load Loss = 77 W
Load Loss = 350 W	Total Loss = 427 W
Average Winding Temp. rise Guarantee = 65 °C	Top-Oil Temp. rise Guarantee = 60 °C
Weight of core = 43 kg	Volume of Oil = 35 litre
Weight of tank and fitting = 49 kg	Weight of winding (H.V. + L.V.) = 14 kg

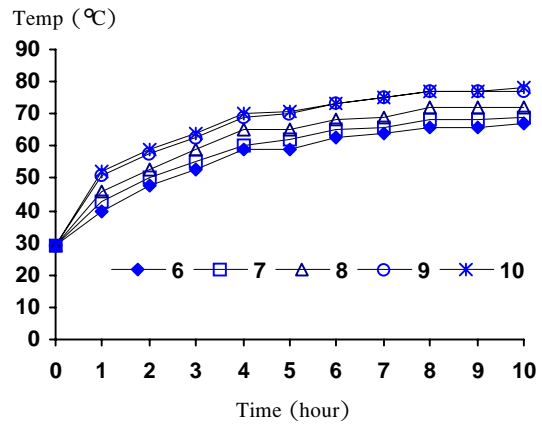


Front view

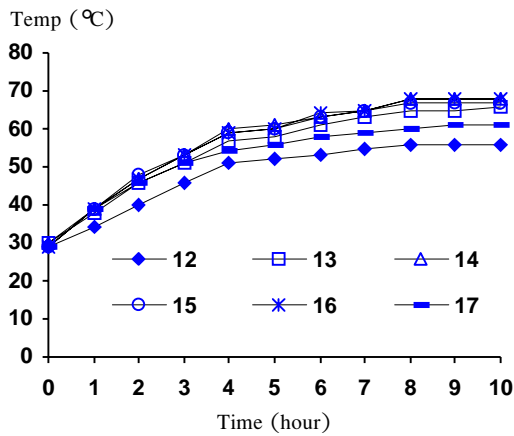
รูปที่ 2 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน



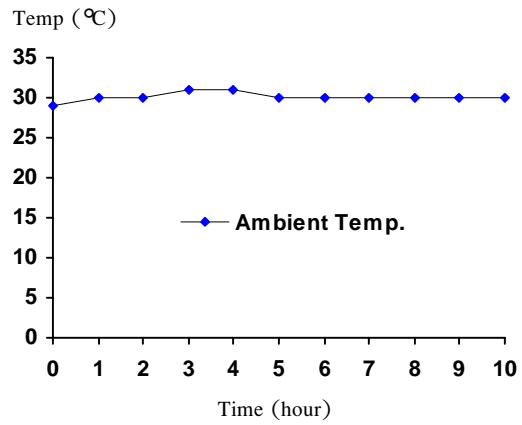
รูปที่ 3 ผลของอุณหภูมิตลอดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร



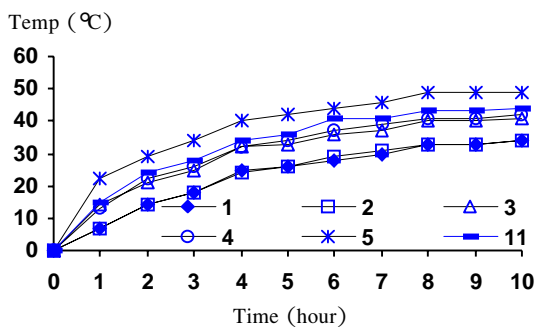
รูปที่ 4 ผลของอุณหภูมิตลอดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร



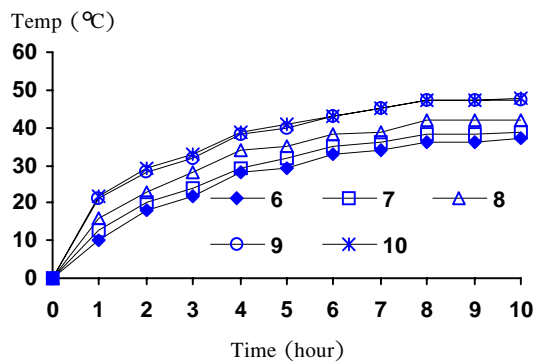
รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร



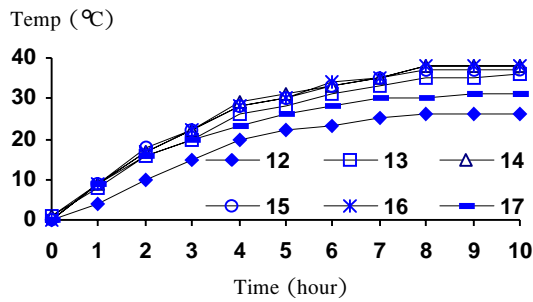
รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิตลอดขณะทำการทดสอบแบบลัดวงจร



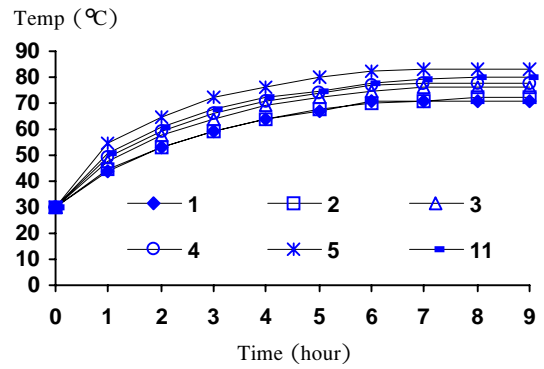
รูปที่ 7 ผลของอุณหภูมิตลอดเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร



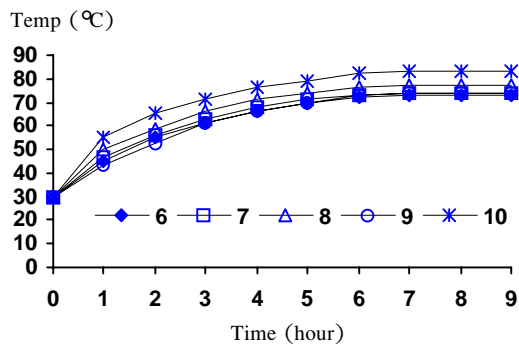
รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิตลอดเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร



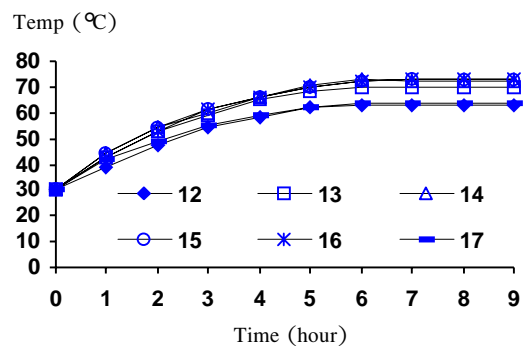
รูปที่ 9 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบลัดวงจร



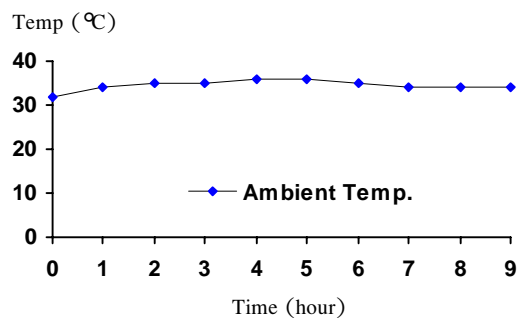
รูปที่ 10 ผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



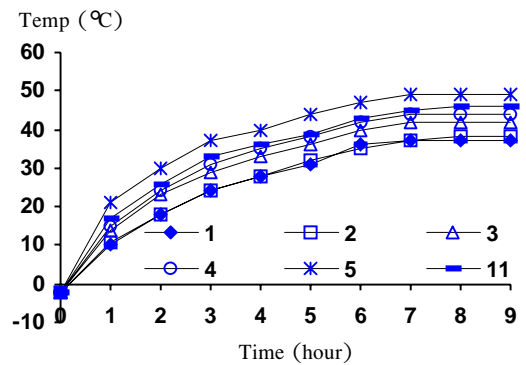
รูปที่ 11 ผลของอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



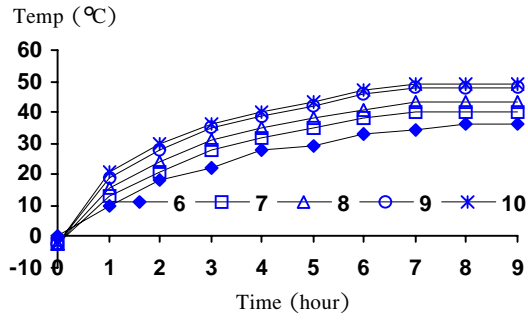
รูปที่ 12 ผลของอุณหภูมิน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



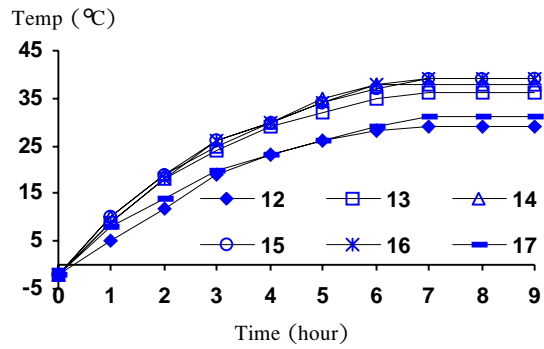
รูปที่ 13 ผลของอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการทดสอบเมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



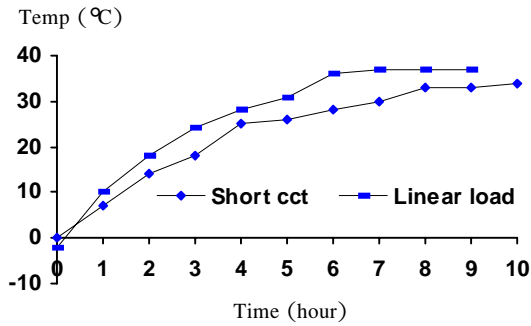
รูปที่ 14 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, 5, 11 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



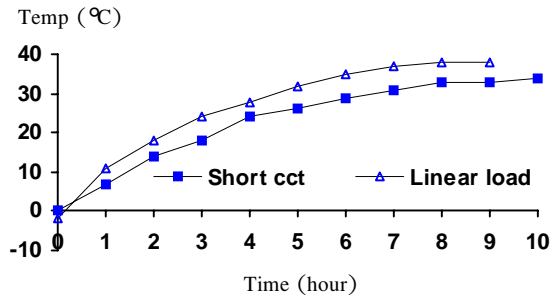
รูปที่ 15 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



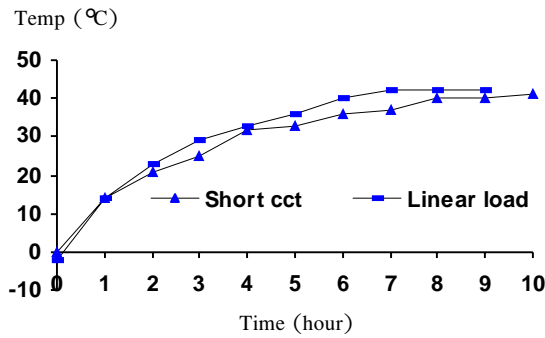
รูปที่ 16 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12, 13, 14, 15, 16, 17 เมื่อเป็นการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



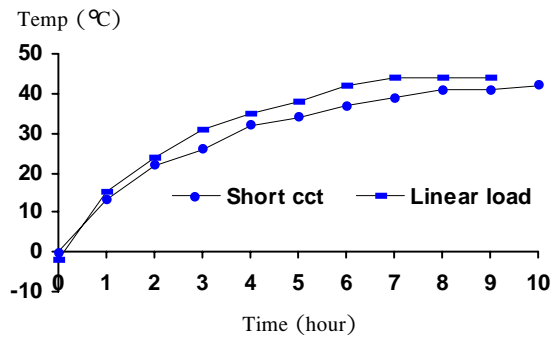
รูปที่ 17 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



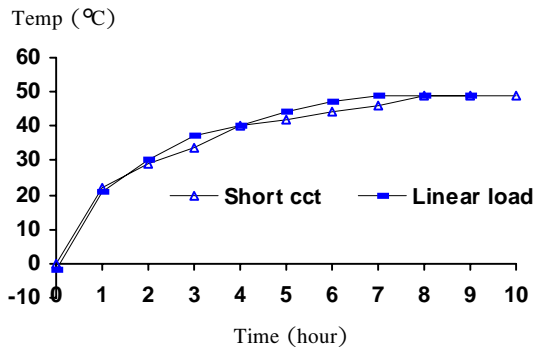
รูปที่ 18 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



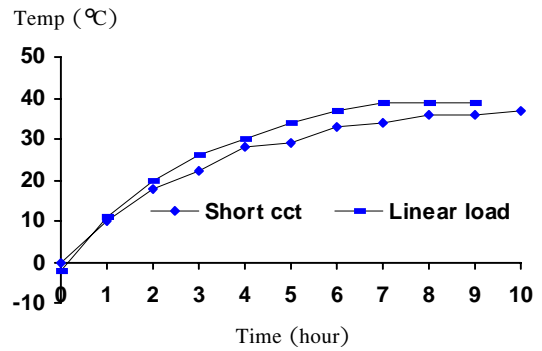
รูปที่ 19 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



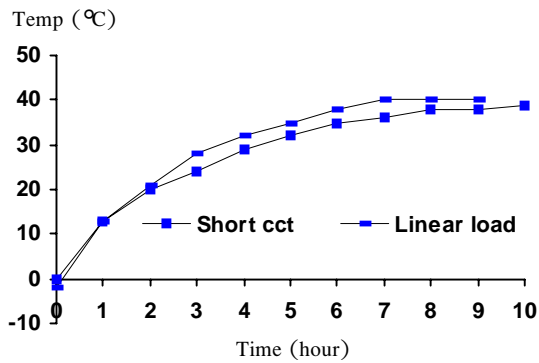
รูปที่ 20 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



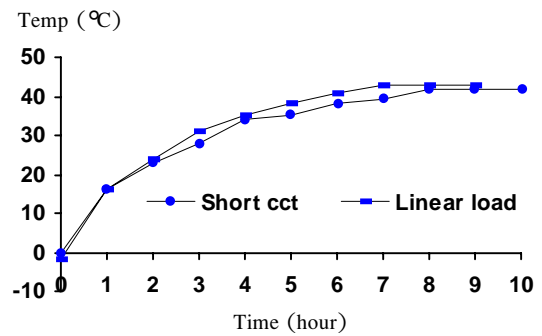
รูปที่ 21 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



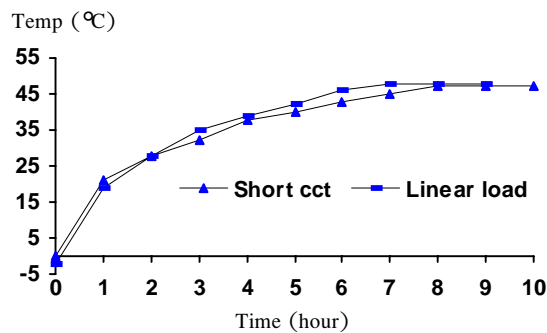
รูปที่ 22 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



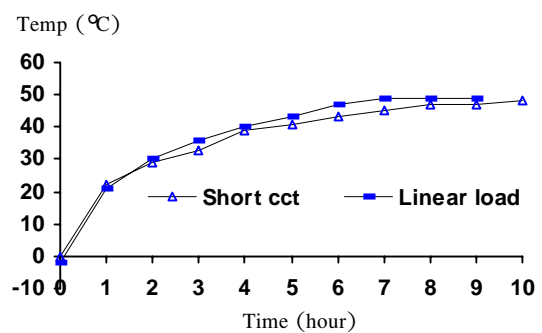
รูปที่ 23 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



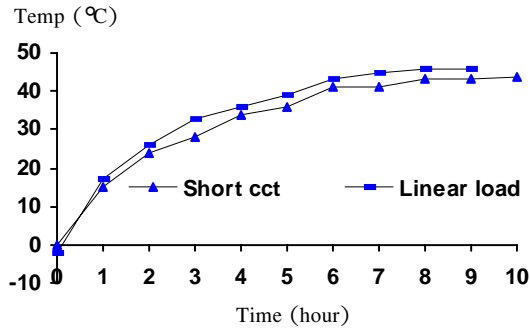
รูปที่ 24 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



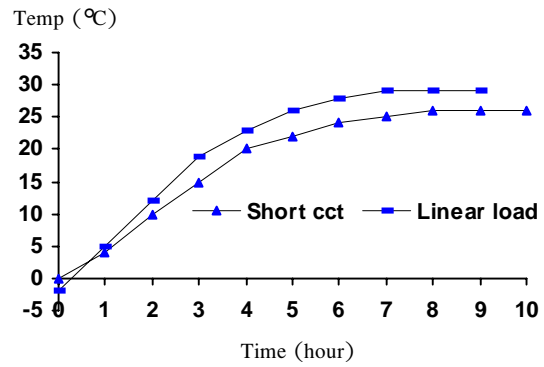
รูปที่ 25 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



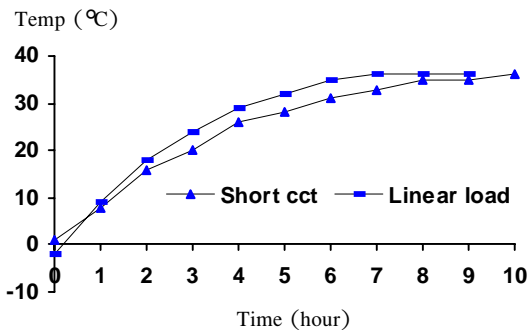
รูปที่ 26 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง ณ ตำแหน่งที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



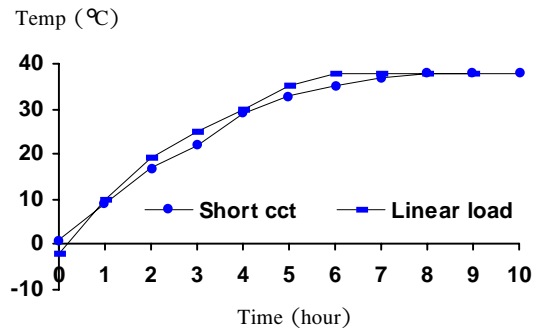
รูปที่ 27 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ ณ ตำแหน่งที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



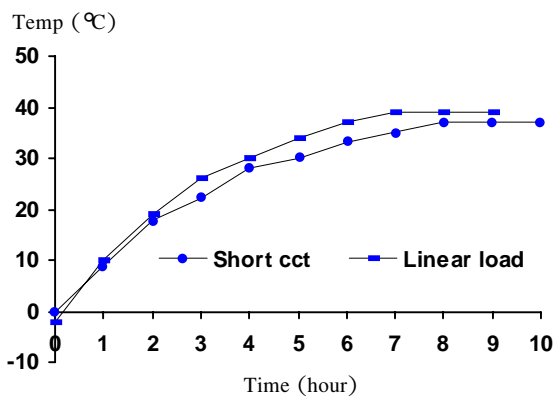
รูปที่ 28 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 12 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



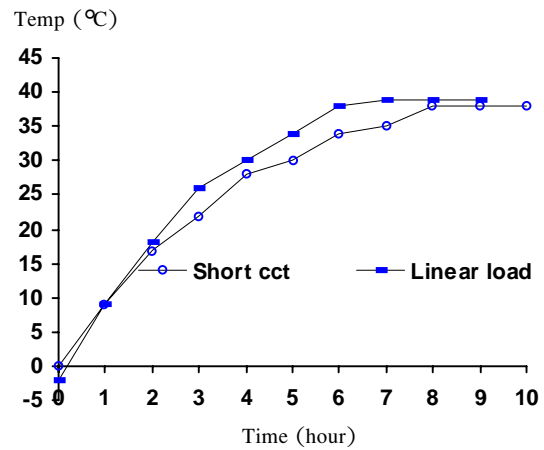
รูปที่ 29 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 13 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



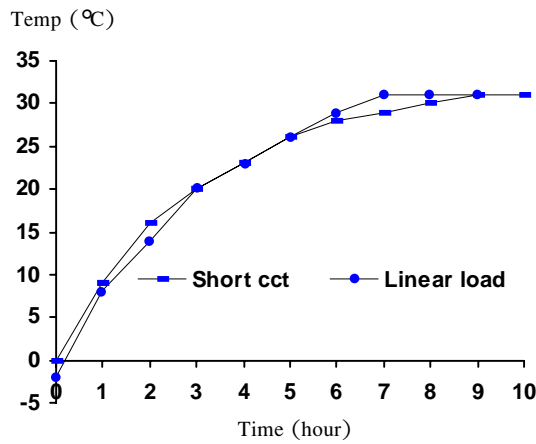
รูปที่ 30 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



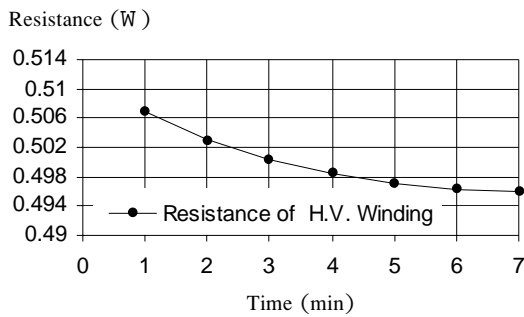
รูปที่ 31 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 15 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



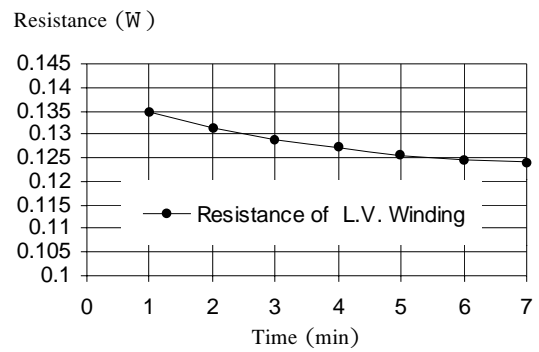
รูปที่ 32 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 16 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



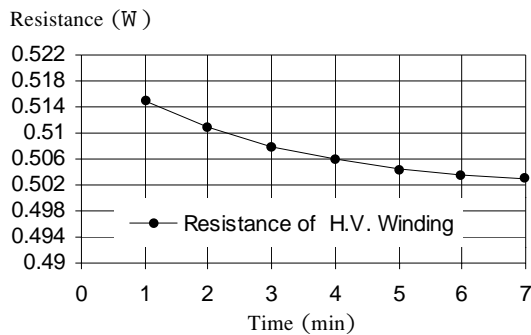
รูปที่ 33 ผลของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน ณ ตำแหน่งที่ 17 เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบแบบลัดวงจรกับโหลดเชิงเส้น



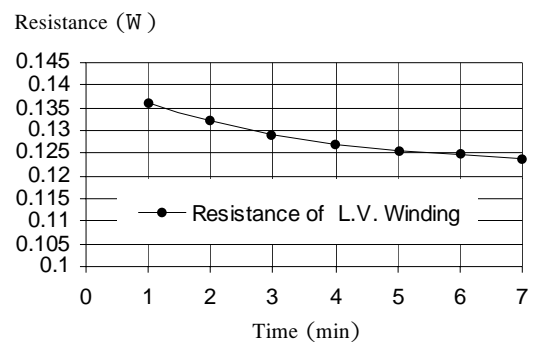
รูปที่ 34 ผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบลัดวงจร



รูปที่ 35 ผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงดันต่ำ โดยทดสอบแบบลัดวงจร



รูปที่ 36 ผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงสูง โดยทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น



รูปที่ 37 ผลของความต้านทานที่วัดได้ต่อช่วงเวลาหลังจากตัดกระแสไฟฟ้าของขดลวดแรงดันต่ำ โดยทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น

2. วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 7, 8, 10, 11 เป็นผลของอุณหภูมิของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำในสภาวะทดสอบแบบลัดวงจรและโหลดเชิงเส้น ผลการทดสอบทั้งสองเงื่อนไขพบว่า อุณหภูมิขดลวดด้านบนสูงกว่าขดลวดด้านล่างตลอดช่วงการทดสอบ เพราะฉะนั้นค่าอุณหภูมิที่สูงมีผลทำให้ฉนวนด้านบนเสื่อมสภาพเร็วกว่าบริเวณตำแหน่งอื่นๆ

จากรูปที่ 9, 12 เป็นผลของอุณหภูมิน้ำมันที่ระดับต่างๆ ซึ่งเห็นว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 16 จะมีค่าสูงสุด ส่วนตำแหน่งที่ 17 เป็นตำแหน่งของเบ้าน้ำมันที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำมันบริเวณด้านบนที่ผู้ผลิตออกแบบสร้างขึ้น ซึ่งค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่บริเวณเบ้าน้ำมันนี้ ลดด้วยอุณหภูมิแวดล้อมก็คืออุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน (Θ_{or}) จากรูปกราฟที่ 33 จะพบว่าการทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้น ใช้เวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมง (โหลดเชิงเส้นใช้เวลา 9 ชั่วโมง ส่วนแบบลัดวงจรใช้เวลา 10 ชั่วโมง) สาเหตุความแตกต่างกันของทั้ง 2 วิธีนั้น เกิดจากระดับแรงดันไฟฟ้าที่เป็นแหล่งจ่ายให้กับหม้อแปลงมีการเปลี่ยนแปลงขณะทดสอบ และระบบการหมุนเวียนของน้ำมันภายในถึงหม้อแปลงที่แตกต่างกันบ้าง

เมื่อทราบค่า Θ_{or} แล้วก็สามารถคำนวณหาค่าเวลาความร้อนคงตัวของน้ำมัน (t_0) โดยพิจารณาที่ประมาณร้อยละ 63 ของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ซึ่งสามารถแสดงผลลัพธ์ที่ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการทดสอบหาอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่ตำแหน่ง 17 และค่าเวลาความร้อนของน้ำมันคงตัว

ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน (Θ_{or}) โดยวิธีการลัดวงจร	31 °C
ค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน (Θ_{or}) โดยใช้โหลดเชิงเส้น	31 °C
t_0 จากการทดสอบ โดยลัดวงจร	3 hours
t_0 จากการทดสอบ โดยใช้โหลดเชิงเส้น	3 hours

หมายเหตุ

- อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน = อุณหภูมิของน้ำมัน - อุณหภูมิแวดล้อม

ทดสอบแบบลัดวงจร พิจารณาชั่วโมงสุดท้ายของการทดสอบ (ชั่วโมงที่ 10)

$$\Theta_{or} = \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (ตำแหน่ง 17) - อุณหภูมิแวดล้อม} = 61^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C} = 31^{\circ}\text{C}$$

- ที่ร้อยละ 63 ของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน (ตำแหน่งที่ 17) ที่เวลา 10 ชั่วโมง = $0.63 \times 25^{\circ}\text{C} = 19.53^{\circ}\text{C}$
- จากกราฟรูปที่ 33 จะได้ (t_0) \gg 3 ชั่วโมง

ทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น พิจารณาชั่วโมงสุดท้ายของการทดสอบ (ชั่วโมงที่ 9)

$$\Theta_{or} = \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (ตำแหน่ง 17) - อุณหภูมิแวดล้อม} = 65^{\circ}\text{C} - 34^{\circ}\text{C} = 31^{\circ}\text{C}$$

- ที่ร้อยละ 63 ของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน (ตำแหน่งที่ 17) ที่เวลา 10 ชั่วโมง = $0.63 \times 25^{\circ}\text{C} = 19.53^{\circ}\text{C}$
- จากกราฟรูปที่ 33 จะได้ (t_0) \gg 3 ชั่วโมง

จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ และของการทดสอบทั้ง 2 แบบมีค่าเท่ากันก็แสดงว่าสามารถใช้การทดสอบโดยวิธีการลัดวงจรแทนการทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้นได้

จากรูปที่ 34-37 จากข้อมูลที่ได้นำไปเขียนกราฟ เพื่อหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า โดยใช้หลักการเขียนรูปกราฟดังรูปที่ 1 จากนั้นใช้สมการที่ 1, 2 เพื่อหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (Θ_{w2}) โดยกำหนดให้ k เท่ากับ 234.5 และนำไปหาค่า Θ_{wr} ค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าการคำนวณหาค่าอุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด

ตำแหน่งที่ทดสอบ	Θ_{w1} °C	R_{t1} W	Θ_{w2} °C	R_{t2} W	Θ_{wr} °C
ขดแรงดันต่ำ(ลัดวงจร)	31	0.1206	73.708	0.14	44.708
ขดแรงดันสูง(ลัดวงจร)	31	0.4417	73.677	0.5127	43.677
ขดแรงดันต่ำ(โหลดเชิงเส้น)	31	0.1206	79	0.1424	45
ขดแรงดันสูง(โหลดเชิงเส้น)	31	0.4417	78.3055	0.5204	45.3055

หมายเหตุ

ทดสอบโดยใช้วิธีการลัดวงจร

$$\Theta_{wr}(L.V.) = \Theta_{w2}(L.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 73.708 \text{ } ^\circ\text{C} - 29 \text{ } ^\circ\text{C} = 44.708 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{wr}(H.V.) = \Theta_{w2}(H.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 73.677 \text{ } ^\circ\text{C} - 30 \text{ } ^\circ\text{C} = 43.677 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น

$$\Theta_{wr}(L.V.) = \Theta_{w2}(L.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 79 \text{ } ^\circ\text{C} - 34 \text{ } ^\circ\text{C} = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{wr}(H.V.) = \Theta_{w2}(H.V.) - \text{อุณหภูมิแวดล้อม} = 78.3055 \text{ } ^\circ\text{C} - 33 \text{ } ^\circ\text{C} = 45.3055 \text{ } ^\circ\text{C}$$

* ค่าความต้านทานที่ได้จากการทดสอบและจากการเขียนกราฟเป็นค่าความต้านทานที่จุดต่อทางแรงดันสูง และแรงดันต่ำของหม้อแปลง

จากผลการคำนวณเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ Θ_{wr} ของการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกับวิธีการลัดวงจร ซึ่งแสดงว่าสามารถใช้การทดสอบโดยวิธีลัดวงจรแทนการทดสอบแบบใช้โหลดเชิงเส้นได้

จากรูปที่ 3, 4, 7, 8 เป็นอุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำและแรงดันสูงที่ได้จากการทดสอบทั้งสองสภาวะ จะเห็นว่าที่ขดลวดแรงดันต่ำที่ตำแหน่ง 5 และขดลวดแรงดันสูงที่ตำแหน่ง 10 มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ

จากตารางที่ 4 เป็นผลการเปรียบเทียบจากการทดสอบค่า g_r จากทั้งสองเงื่อนไขจะมีค่าเท่าๆ กัน ซึ่งหมายความว่า สามารถแทนการทดสอบโดยใช้โหลดจริงด้วยวิธีการลัดวงจรได้ และผลการคำนวณจากทั้งสองวิธีก็มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนผลจากการคำนวณมีค่าสูงกว่าทดสอบเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุมาจากการผลการเขียนกราฟหาค่าความต้านทาน ณ จุดตัดกระแสไฟฟ้า (R_{t2}) ผิดพลาดบ้างเล็กน้อย รวมถึงข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจากเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต้านทานลวดตัวนำ

ตารางที่ 4 ผลของค่าการทดสอบและการคำนวณค่า g_r ในสภาวะทดสอบวิธีการลัดวงจรและใช้โหลดเชิงเส้น

วิธีการทดสอบและการคำนวณ	$g_r(H.V.)$, °C	$g_r(L.V.)$, °C
ทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร	10	11
ทดสอบโดยใช้โหลดเชิงเส้น	10	10
จากการคำนวณ(สมการที่ 4,5)โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจากการทดสอบแบบลัดวงจร	11.677	12.708
จากการคำนวณ(สมการที่4,5)โดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจากการทดสอบใช้โหลดเชิงเส้น	11.3055	11

หมายเหตุ

ทดสอบโดยใช้วิธีการลัดวงจร พิจารณาชั่วโมงที่ 10

$$\Theta_{gr}(\text{test}) = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ (ตำแหน่ง 5)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (ตำแหน่ง 16)} = 49 \text{ }^{\circ}\text{C} - 38 \text{ }^{\circ}\text{C} = 11 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{gr}(\text{test}) = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง (ตำแหน่ง 10)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน (ตำแหน่ง 16)} = 48 \text{ }^{\circ}\text{C} - 38 \text{ }^{\circ}\text{C} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{gr(L.V.)\text{calculated}} = \Theta_{wr} - \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} = 44.708 - \frac{38 + 26}{2} = 12.708 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{gr(H.V.)\text{calculated}} = \Theta_{wr} - \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} = 43.677 - \frac{38 + 26}{2} = 11.677 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ทดสอบโดยใช้แบบโหลดเชิงเส้น พิจารณาชั่วโมงที่ 9

$$\Theta_{gr}(\text{test}) = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ (ตำแหน่ง 5)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} = 49 \text{ }^{\circ}\text{C} - 39 \text{ }^{\circ}\text{C} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{gr}(\text{test}) = \text{อุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง (ตำแหน่ง 10)} - \text{อุณหภูมิน้ำมันด้านบน(ตำแหน่ง16)} = 49 \text{ }^{\circ}\text{C} - 39 \text{ }^{\circ}\text{C} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{gr(L.V.)\text{calculated}} = \Theta_{wr} - \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} = 45 - \frac{39 + 29}{2} = 11 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_{gr(H.V.)\text{calculated}} = \Theta_{wr} - \frac{\Theta_{ir} + \Theta_{br}}{2} = 45.3055 - \frac{39 + 29}{2} = 11.3055 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

จากรูปที่ 7-9 เป็นผลลัพธ์จากการทดสอบที่เวลา 10 ชั่วโมงของการทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร และรูปที่14-16 ที่เวลา 9 ชั่วโมงของการทดสอบแบบโหลดเชิงเส้น เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเพิ่มกับระดับความสูงของขดลวดและระดับน้ำมันได้ดังรูปกราฟที่ 38 a) - d) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 12-17 ดังต่อไปนี้

เมื่อทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร

- จากรูปที่ 7 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ (y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันต่ำ(x)

$$Y = -4 \times 10^{-7} X^3 + 0.0005 X^2 + 0.0454 X + 33.541 \quad (12)$$

- จากรูปที่ 8 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง (y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันสูง (x)

$$Y = -1 \times 10^{-5} X^3 + 0.0022 X^2 - 0.0148 X + 37.07 \quad (13)$$

- จากรูปที่ 9 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน (y) ต่อความสูงของขดลวด (x)

$$Y = 2.5063 \ln(x) + 26.336 \quad (14)$$

เมื่อทดสอบแบบใช้ไหลดเชิงเส้น

- จากรูปที่ 14 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันต่ำ (y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันต่ำ (x)

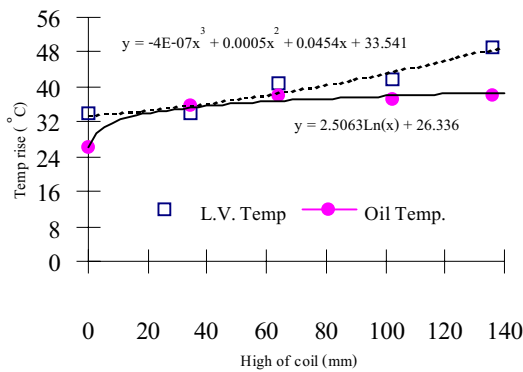
$$Y = 0.0881x + 35.989 \tag{15}$$

- จากรูปที่ 15 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูง (y) ต่อความสูงของขดลวดแรงดันสูง (x)

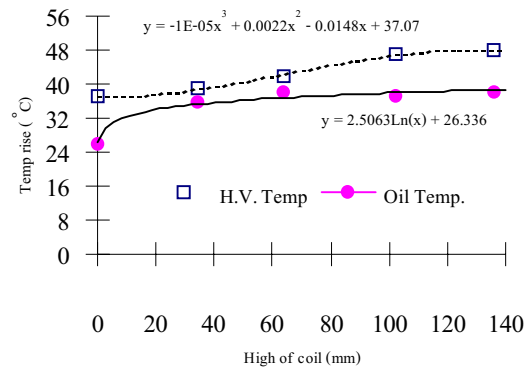
$$Y = 0.1x + 36.383 \tag{16}$$

- จากรูปที่ 16 ได้สมการอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน (y) ต่อความสูงของขดลวด (x)

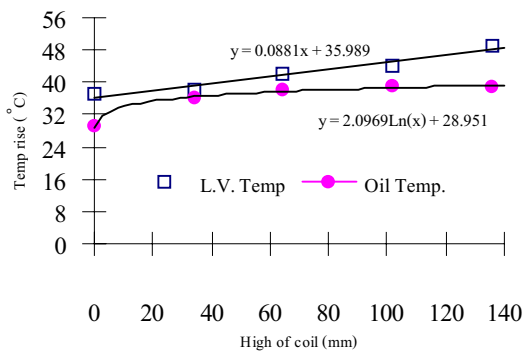
$$Y = 2.0969 \ln(x) + 28.951 \tag{17}$$



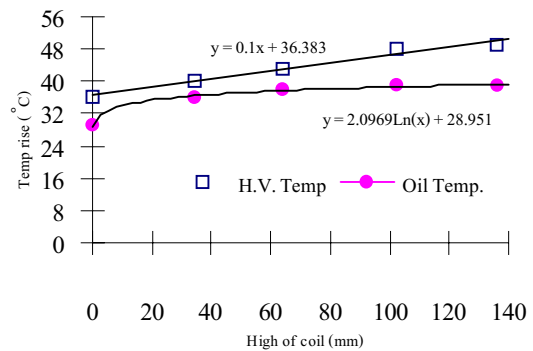
a)



b)



c)



d)

- รูปที่ 38**
- ผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของการทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร
 - ผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของการทดสอบโดยวิธีการลัดวงจร
 - ผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันต่ำและน้ำมันของการทดสอบแบบไหลดเชิงเส้น
 - ผลของอุณหภูมิเพิ่มที่ระดับความสูงต่างๆ ของขดลวดแรงดันสูงและน้ำมันของการทดสอบแบบไหลดเชิงเส้น

จากผลการทดสอบทั้งสองเงื่อนไขเห็นว่าความชื้นของเส้นอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นตรงและมีค่าเท่าๆ กัน และเส้นของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันค่อนข้างจะโค้งคล้ายๆ กัน ซึ่งผลที่ได้จะสามารถทำให้ทราบว่าอุณหภูมิน้ำมันที่ระดับกลางถึงกับด้านบนถึงมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าระบบการหมุนเวียนของน้ำมันในหม้อแปลงที่ออกแบบ ONAN ไม่ค่อยดีนัก พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบนี้จะสามารถนำไปทำนายอุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดและอุณหภูมิน้ำมันที่สภาวะคงตัวและสภาวะชั่วขณะโดยใช้สมการที่ 8-11

ข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

1. เครื่องแสดงผลอุณหภูมิ ยี่ห้อ DIGICON รุ่น ID-7, CA (K) , ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-400 °C
2. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K โครเมิล/อลูเมิล ช่วงการวัดอุณหภูมิ -270 ถึง 1,372 °C

สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถแยกสรุปได้เป็นข้อๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิที่ด้านบนของขดลวด มีค่ามากกว่าที่ระดับต่ำรองลงมา และอุณหภูมิมีลักษณะค่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นตรงตลอดความสูง
2. อุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่ระดับความสูงเดียวกับขดลวดด้านบน จะมีค่าอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิที่ระดับต่ำรองลงมา และอุณหภูมิมิมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง
3. อุณหภูมิของขดลวดแรงดันไฟฟ้าต่ำ จะมีค่าใกล้เคียงกับที่แรงดันไฟฟ้าสูง
4. อุณหภูมิของขดลวดจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิที่น้ำมัน เมื่อพิจารณาระยะความสูงเดียวกัน

ผลที่ได้จากการทดสอบทำให้ทราบว่าจุดที่ร้อนสุดของหม้อแปลงอยู่ที่ขดลวดด้านบนที่เป็นจุดที่มีการถ่ายเทความร้อนไม่ดีนัก เพราะฉะนั้นเมื่อออกแบบหม้อแปลง น่าจะออกแบบให้มีร่องน้ำมันที่มีขนาดกว้างเพื่อที่จะให้น้ำมันหม้อแปลงมีการหมุนเวียนที่บริเวณขดลวดมากเป็นพิเศษ แต่ต้องคำนึงถึงการ flash over ด้วย จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ จะทำให้สามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบหม้อแปลง การป้องกันหม้อแปลงหรือป้องกันอุปกรณ์ที่นำมาต่อรวมด้วยกับหม้อแปลง และยังสามารถนำข้อมูลจำเพาะที่ได้จากการทดสอบนี้ใช้ในการทำนายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะใช้งานของหม้อแปลงที่ออกแบบ (design) เดียวกันทุกๆ ตัว

ในการทดลองนี้ใช้หม้อแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า 380V/220V, 10kVA สาเหตุอันเนื่องมาจากการจัดหาโหลดที่นำมาทดลองที่มีปริมาณไม่มากนักและเป็นการป้องกันอันตรายที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำไปยังตัวเทอร์โมคัปเปิล แต่จะเป็นแนวทางการพัฒนาในการใช้หม้อแปลงที่มีขนาด (kVA) ใหญ่และแรงดันไฟฟ้าสูง (KV) ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถอาศัยหลักการที่นำเสนอ นำไปทดสอบใช้กับการออกแบบหม้อแปลงที่จ่ายให้กับโหลดที่เป็นประเภทไม่เชิงเส้น (Non-linear load) ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท พงษ์พิมาณการไฟฟ้า จำกัด ที่สนับสนุนอุปกรณ์สำหรับงานวิจัยนี้จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. IEEE, Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Pad-Mounted Distribution Transformers Rated 500 kVA and Less with 65 °C or 55 °C Average Winding Rise, *ANSI/IEEE C57.91-1981*.
2. Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer, *IEC 354-1991*.
3. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, 2524 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง มอก. 384-2524 กรุงเทพมหานคร.
4. สิริวิช ทัดสวน, บุญเลิศ สื่อเฉย, ศุภี บรรจงจิตร, 2541 “การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่ายชนิดแช่น้ำมันขณะทำการต่อโหลดโดยซอฟต์แวร์ ซึ่งเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน IEEE กับค่ามาตรฐาน IEC,” *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 14 ฉบับที่ 1, หน้า 52-60, เมษายน 2541.