

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมสำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิถึงหม้อแปลง กำลังขนาดพิกัด 25 MVA แบบ ONAF

ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา^{1,*}, ศตวรรษ เมืองชื่น¹, จรัสพงศ์ เทพมณี¹, สมชาย สัมพันธ์ศรี¹ และ กิตติคม นนทบุรีประสาท²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย

² สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะบัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเชียงราย

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: dumrongsak.wongta@crc.ac.th โทรศัพท์: 084-1727780

(รับบทความ: 3 มีนาคม 2569; แก้ไขบทความ: 29 เมษายน 2569; ตอรับบทความ: 8 พฤษภาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม สำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิถึงของหม้อแปลงกำลังขนาด 25 MVA ที่ใช้ระบบระบายความร้อนแบบ ONAF โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับความแม่นยำในการประเมินอุณหภูมิภายใต้สภาวะโหลดที่แปรผันตามเวลา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นการบูรณาการระหว่างแนวคิดของแบบจำลองความร้อนสถานะคงที่และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต เพื่อให้สามารถคำนวณทั้งอุณหภูมิสมมูลปลายทางและลักษณะการตอบสนองเชิงเวลาได้อย่างสอดคล้องกัน ในการจำลองได้กำหนดอุณหภูมิแวดล้อมคงที่ที่ 28 องศาเซลเซียส และกำหนดช่วงเวลาการคำนวณทุก ๆ 15 นาที ครอบคลุมระยะเวลา 24 ชั่วโมง รวมทั้งสิ้น 96 จุดข้อมูล โดยใช้อัตราส่วนกระแสโหลดที่แปรผันในช่วง 0.3 – 1.8 ต่อหน่วย ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบพบว่า แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมสามารถสะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้สอดคล้องกับพฤติกรรมการทำงานจริงมากกว่าแบบจำลองสถานะคงที่ และแบบจำลองเชิงพลวัต นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบ่งช่วงการทดสอบออกเป็น 3 ระดับโหลด ได้แก่ โหลดต่ำ โหลดปานกลาง และโหลดสูง ภายใต้เงื่อนไขการเพิ่มกำลังสูญเสียในขดลวดตั้งแต่ 0 ถึง 57.39 kW ตามพิกัดกำลังสูญเสียของหม้อแปลง ผลการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในแต่ละช่วงโหลดพบว่า แบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 6, 8 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.80, 2.57 และ 3.31 และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.24, 0.66 และ 2.35 ตามลำดับ ผลการทดสอบเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงหม้อแปลงชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์โหลดรวมถึงการพัฒนาระบบติดตามอุณหภูมิของหม้อแปลงในงานปฏิบัติจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม

การอ้างอิงบทความ: ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา, ศตวรรษ เมืองชื่น, จรัสพงศ์ เทพมณี, สมชาย สัมพันธ์ศรี และ กิตติคม นนทบุรีประสาท, "การพัฒนาแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมสำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิถึงหม้อแปลงกำลังขนาดพิกัด 25 MVA แบบ ONAF," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, หน้า 70-85, 2569.

A Hybrid Dynamic Thermal Modeling Approach for Tank Temperature Estimation of a 25-MVA ONAF Power Transformer

Dumrongsak Wongta^{1,*}, Satawat Muangchuen¹, Jaratpong Tepmanee¹, Somchai Sumpansri¹
and Kittikom Nontprasat²

¹ Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangrai College

² Department of Industrial Management, Graduate School, Chiangrai College

*Corresponding Author: dumrongsak.wongta@crc.ac.th, Tel: 084-1727780

(Received: March 3, 2026; Revised: April 29, 2026; Accepted: May 8, 2026)

Abstract

This research presents the development of a hybrid dynamic thermal model for estimating the tank temperature of a 25 MVA power transformer equipped with an Oil Natural Air Forced (ONAF) cooling system. The primary objective is to enhance the accuracy of temperature prediction under time-varying load conditions. The proposed model integrates the principles of steady-state thermal modeling and dynamic thermal modeling, enabling the simultaneous determination of both the final steady-state temperature and the transient thermal response. In the simulation, the ambient temperature was assumed constant at 28 °C, and the computation was performed at 15-minute intervals over a 24-hour period, yielding a total of 96 data points. The load current was varied within a range of 0.3 to 1.8 per unit (p.u.). The comparative results indicate that the hybrid dynamic thermal model more accurately captures the temperature variation trends in accordance with actual operating behavior than either the steady-state or conventional dynamic thermal model. Furthermore, the model performance was validated against the Finite Element Method (FEM). The evaluation was conducted across three load levels conditions: low, medium, and high, with copper losses ranging from 0 to 57.39 kW, consistent with the transformer's rated loss specifications. The mean absolute percentage error (MAPE) for the steady-state model was found to be 6%, 8%, and 10% for low, medium, and high load conditions, respectively. In comparison, the dynamic thermal model yielded MAPE values of 1.80%, 2.57%, and 3.31%, while the hybrid dynamic thermal model achieved lower errors of 1.24%, 0.66%, and 2.35%, respectively. The results demonstrate that the hybrid dynamic thermal model provides the lowest average temperature estimation error among the considered approaches. This confirms that the proposed model achieves an acceptable level of engineering accuracy and shows strong potential for practical applications in load analysis and real-time transformer temperature monitoring systems.

Keywords: Steady-State Thermal Model, Dynamic Thermal Model, Hybrid Dynamic Thermal Model

Please cite this article as: D. Wongta, S. Muangchuen, J. Tepmanee, S. Sumpansri and K. Nontprasat, "A Hybrid Dynamic Thermal Modeling Approach for Tank Temperature Estimation of a 25-MVA ONAF Power Transformer," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 3, pp. 70-85, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

อุณหภูมิถังหม้อแปลงเป็นปัจจัยที่เกิดจากการทำงานโดยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดปฐมภูมิผ่านแกนเหล็กไปขดลวดทุติยภูมิในการเหนี่ยวนำส่งผลทำให้เกิดความร้อนที่หม้อแปลงไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการทำงานของหม้อแปลงภายใต้สภาวะโหลดที่แปรผันจะก่อให้เกิดความร้อนสะสมภายใน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลง (Top Oil Temperature) และที่อุณหภูมิจุดร้อนขดลวด (Hot-Spot Temperature) จากความร้อนภายในส่งกระทบไปที่อุณหภูมิภายนอก โดยเฉพาะอุณหภูมิถังหม้อแปลง (Tank Temperature) ที่จะสะท้อนสมมูลของการถ่ายเทความร้อนของทั้งระบบอุณหภูมิถังหม้อแปลงที่สูงเกินไป จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฉนวน อายุการใช้งานลดลง และเพิ่มความเสี่ยงต่อความเสียหายของอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า การประเมินและติดตามอุณหภูมิถังหม้อแปลงจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการบริหารจัดการโหลดและการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดอายุการใช้งานของหม้อแปลงกำลัง [1-4] งานวิจัยที่ผ่านมาและมาตรฐาน IEEE C57.91 ให้ความสำคัญอย่างมากกับการประเมินอุณหภูมิน้ำมันชั้นบน และอุณหภูมิจุดร้อนขดลวด เนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงกับการเสื่อมสภาพของฉนวน สำหรับงานวิจัยที่ศึกษามุ่งเน้นอุณหภูมิถังหม้อแปลง (Tank Temperature) ยังมีจำนวนจำกัด ทั้งที่ช่วยเป็นตัวแปรที่สะท้อนสมมูลการถ่ายเทความร้อนของระบบระบายความร้อนทั้งหมด และมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบการระบายความร้อนแบบ ONAF (Oil Natural Air Forced) มีโครงสร้างของถังหม้อแปลงแบบคืบ และพัดลมช่วยเป่าอากาศเพื่อระบายความร้อนจากความร้อนภายในหม้อแปลง

แบบจำลองความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย [5-7] สามารถแบ่งออกเป็นแบบจำลองสถานะคงที่ (Steady-State Model) และแบบจำลองเชิงพลวัต

(Dynamic Model) แบบจำลองสถานะคงที่สามารถประเมินค่าอุณหภูมิสมมูลได้อย่างรวดเร็ว แต่ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงเมื่อโหลดแปรผันตามเวลาได้ ขณะที่แบบจำลองเชิงพลวัตสามารถอธิบายพฤติกรรม การสะสมและการคายความร้อนผ่านค่าคงที่เวลาความร้อนได้ดีกว่า อีกด้านหนึ่งวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบ Finite Element Method (FEM) สามารถจำลองการกระจายอุณหภูมิได้อย่างละเอียดเชิงพื้นที่ [8] แต่ต้องใช้คอมพิวเตอร์และเวลาในการคำนวณเชิงลึกมาก และไม่เหมาะสมสำหรับการประเมินแบบออนไลน์หรือการวิเคราะห์โหลดระยะยาว

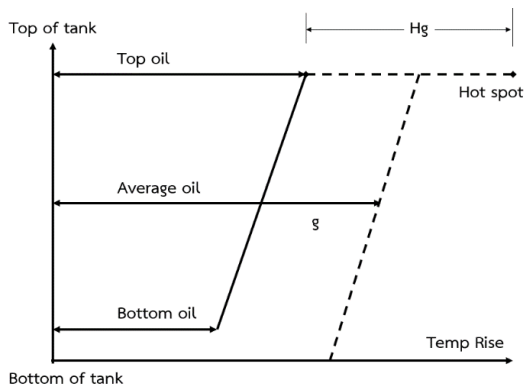
ดังนั้นแนวทางงานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม (Hybrid Dynamic Thermal Model) โดยใช้ข้อมูลทั่วไปจากผู้ผลิตหม้อแปลงกำลังขนาด 25 MVA ที่มีระบบการระบายความร้อนแบบ ONAF โดยใช้หลักการของแบบจำลองสถานะคงที่และแบบจำลองเชิงพลวัตผสมเข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถประเมินทั้งค่าอุณหภูมิสมมูลปลายทางและพฤติกรรม การตอบสนองเชิงเวลาได้พร้อมกัน นอกจากนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์เข้ากับวิธี Finite Element Method (FEM) ภายใต้การทดสอบที่มีการเพิ่มกำลังสูญเสียในขดลวดและวิเคราะห์อุณหภูมิถังจากการระบายความร้อน [9,10] เพื่อสามารถใช้สำหรับการวิเคราะห์โหลดและนำไปขยายสู่การติดตามสถานะความร้อนของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้าจริง

2. แบบจำลองอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังให้แก่โหลด ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการคำนวณค่าพิกัดกระแสใช้งานเท่านั้น แต่ยังต้องประเมินสภาพการทำงานโดยรวมอย่างรอบด้าน โดยเฉพาะกรณีการเดินเครื่องเกินพิกัดกำลัง

บทความวิจัย (Research Article)

(Overloading) แม้ว่าหม้อแปลงอาจสามารถรองรับการจ่ายกำลังที่สูงกว่าค่าพิกัดได้ในเวลาสั้น ๆ แต่การใช้งานลักษณะดังกล่าวย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฉนวน อายุการใช้งาน ความปลอดภัย ตลอดจนเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในระยะยาว [11] การอ้างอิงตามแนวทางมาตรฐาน IEEE C57.91 ได้มีการกำหนดหลักเกณฑ์สำหรับการบริหารจัดการโหลด ร่วมกับการวิเคราะห์อุณหภูมิหม้อแปลง และระบบการระบายความร้อน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การกระจายอุณหภูมิภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบชนิดจุ่มน้ำมัน

เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ภายใต้ขอบเขตที่ไม่กระทบต่อความเชื่อถือได้และความปลอดภัยของระบบ ในด้านความร้อน พฤติกรรมการกระจายอุณหภูมิภายในหม้อแปลงเป็นอีกประเด็นที่ต้องให้ความสำคัญ การเพิ่มขึ้นอุณหภูมิ (Temperature Rise) ทำให้อุณหภูมิน้ำมันหม้อแปลงเพิ่มขึ้นและมีการกระจายตัวในแนวตั้ง โดยบริเวณน้ำมันส่วนล่างของถังจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าส่วนบน ขณะที่อุณหภูมิจุดร้อนของขดลวด จะมีค่าสูงกว่าน้ำมันชั้นบนอีกระดับหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่ใช้สำหรับประเมินการเสื่อมสภาพของฉนวนและอายุการใช้งานของหม้อแปลงโดยตรงจากแบบจำลองความร้อนที่ศึกษาเปรียบเทียบ

2.1 แบบจำลองความร้อนถังหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าชนิดจุ่มน้ำมันขนาดใหญ่ส่วนมากจะมีระบบระบายความร้อนแบบ ONAF มีอุณหภูมิถังหม้อแปลงภายใต้สภาวะที่น้ำมันไหลเวียนโดยใช้หลักการพาความร้อนตามธรรมชาติ และในขณะที่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศยังต้องอาศัยพัดลมช่วยบังคับการไหลของอากาศผ่านเข้าสู่แผงระบายความร้อน แนวคิดสำคัญของแบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมูลพลังงานความร้อน คือความร้อนที่เกิดจากแกนเหล็กและขดลวดจะถูกถ่ายเทสู่น้ำมันฉนวน จากนั้นน้ำมันร้อนจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของถัง และไหลผ่านครีปเพื่อถ่ายเทความร้อนสู่อากาศภายนอก โดยพัดลมจะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนทำให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบลดลงเมื่อเทียบกับระบบ ONAN (Oil Natural Air Natural)

แบบจำลองความร้อนถังหม้อแปลงมุ่งเน้นการพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำมันในถังและอุณหภูมิถังเป็นหลัก [12] โดยถือว่าถังหม้อแปลงทำหน้าที่เสมือนตัวกลางถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำมันภายในกับอากาศภายนอก อุณหภูมิถังจึงเป็นผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียรวมทั้งหมด และจากความสามารถในการคายความร้อนของระบบระบายความร้อนแบบพัดลม ในเชิงพลวัตแบบจำลองพิจารณาค่าคงที่เวลาทางความร้อนของถังหม้อแปลง (Tank Thermal Time Constant) สามารถสะท้อนความหน่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิถังจะค่อย ๆ สูงขึ้นตามลักษณะแบบเลขชี้กำลัง (Exponential) จนเข้าสู่สมมูลใหม่ และเมื่อโหลดลดลงอุณหภูมิจะลดลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปเช่นเดียวกัน [13,14] โครงข่ายความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance Network) อาศัยแนวคิดเทียบเคียงกับวงจรไฟฟ้า เนื่องจากพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนมีลักษณะทางคณิตศาสตร์คล้ายกับการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรความต้านทาน

บทความวิจัย (Research Article)

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (1)$$

$$\Delta T = Q \cdot R_{th} \quad (2)$$

เมื่อ

Q คือ การถ่ายเทความร้อน, (Joule)

Δt คือ อุณหภูมิร้อนที่เปลี่ยนไป, ($^{\circ}\text{C}$)

R_{th} คือ ความต้านทานความร้อน, ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

ค่าความต้านทานความร้อนขึ้นอยู่กับระบบกลไกการถ่ายเทความร้อน ได้แก่

$$R_{th} = R_{\Theta TO} + R_{\Theta AF} + R_{cond} \quad (3)$$

$$R_{\Theta TO} = \frac{1}{h_{oil} \cdot A_{tank}} \quad (4)$$

$$R_{\Theta AF} = \frac{1}{h_{Air} \cdot A_{tank}} \quad (5)$$

$$R_{cond} = \frac{L}{\kappa \cdot A_{tank}} \quad (6)$$

เมื่อ

$R_{\Theta TO}$ คือ การพาความร้อนของน้ำมัน

$R_{\Theta AF}$ คือ การพาความร้อนพัดลม

R_{cond} คือ การนำความร้อนวัสดุ

h_{oil} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำมัน, ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

h_{Air} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ, ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

κ คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ

A_{tank} คือ พื้นที่ผิวตัวถังและครีป, (m^2)

2.2 แบบจำลองความร้อนสถานะคงที่

อุณหภูมิถึงหม้อแปลงในสถานะคงที่ (Steady-State Thermal Model) คือค่าอุณหภูมิความร้อนถึงที่มีค่าคงตัว เมื่อหม้อแปลงทำงานภายใต้ระดับโหลดและสภาพแวดล้อม [15] ที่ไม่เปลี่ยนแปลงเป็นระยะเวลานานพอจนเกิดสมดุลทางความร้อน ความร้อนภายในหม้อแปลงอุณหภูมิขดลวดและแกนเหล็ก มีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทออกสู่บรรยากาศผ่านผิวถังและอุปกรณ์ระบายความร้อน ในสถานะที่อุณหภูมิถึงจะไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลา แต่จะคงอยู่ที่ระดับหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียรวม ค่าความต้านทานความร้อนและอุณหภูมิแวดล้อมภายนอก หากโหลดเพิ่มขึ้น ค่ากำลังสูญเสียจะสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิถึงเข้าสู่สมดุลใหม่ที่สูงกว่าเดิม แต่ยังคงเป็นค่าคงที่เมื่อถึงจุดสมดุลอีกครั้ง

$$P_{loss} = P_{core} + P_{cu} K^2 \quad (7)$$

$$\Delta \Theta_{tank,ss} = P_{loss} \cdot R_{th} \quad (8)$$

$$\Theta_{tank,ss} = \Theta_A + P_{loss} \cdot R_{th} \quad (9)$$

เมื่อ

P_{loss} คือ กำลังสูญเสียรวม, (W)

P_{core} คือ กำลังสูญเสียแกนเหล็ก, (W)

P_{cu} คือ กำลังสูญเสียขดลวด, (W)

K คือ อัตราส่วนของกระแสโหลด

$K = (I_{Load} / I_{Rated})$, Per unit (pu)

บทความวิจัย (Research Article)

$\Delta\Theta_{\text{tank,ss}}$ คือ อุณหภูมิเพิ่มของตัวถังสภาวะคงที่, ($^{\circ}\text{C}$)

$\Theta_{\text{tank,ss}}$ คือ อุณหภูมิถึงสภาวะคงที่, ($^{\circ}\text{C}$)

Θ_A คือ อุณหภูมิแวดล้อมภายนอก, ($^{\circ}\text{C}$)

$$\frac{d\Theta_{\text{tank}}}{dt} = \frac{\Theta_{\text{tank,ss}} - \Theta_{\text{tank}}}{\tau_{\text{tank}}} \quad (11)$$

$$\tau_{\text{tank}} = C_{\text{tank}} R_{th} \quad (12)$$

$$\Theta_{\text{tank}}(k) \frac{\tau_{\text{tank}}}{\tau_{\text{tank}} + \Delta t} \Theta_{\text{tank}}(k-1) + \frac{\Delta t}{\tau_{\text{tank}} + \Delta t} \Theta_{\text{tank,ss}}(k) \quad (13)$$

2.3 แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต

แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต (Dynamic Thermal Model) หมายถึง ค่าอุณหภูมิถึงหม้อแปลงที่มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ขึ้นกับเวลาภายใต้สภาวะที่โหลดและสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ไม่ได้พิจารณาเพียงแค่ว่าค่าคงที่ เมื่อมีค่าเข้าสู่สมดุล แต่คำนึงถึงพฤติกรรมตอบสนองทางความร้อนของถังที่มีความหน่วง [16-18]

เมื่อกำลังสูญเสียภายในหม้อแปลงเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มโหลด ความร้อนจะถ่ายเทจากขดลวดสู่น้ำมันและจากน้ำมันสู่ผิวถัง จากนั้นจึงระบายออกสู่อากาศภายนอก แม้ว่าอุณหภูมิผิวถังจะไม่เพิ่มขึ้นทันทีตามกำลังสูญเสีย แต่จะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงตามค่าคงที่เวลาทางความร้อนของถัง (Tank Thermal Time Constant) ซึ่งสะท้อนความจุความร้อนของโครงสร้างเหล็ก น้ำมัน และมวลรวมของหม้อแปลง

ในเชิงคณิตศาสตร์ แบบจำลองเชิงพลวัตอาศัยการคำนวณอุณหภูมิถึงในช่วงเวลาถัดไปจากค่าอุณหภูมิเดิม รวมกับผลของความแตกต่างระหว่างกำลังความร้อนที่เกิดขึ้นและความสามารถในการระบายความร้อน ณ ช่วงเวลานั้น ทำให้สามารถจำลองพฤติกรรมอุณหภูมิเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได หรือแบบแปรผันรายชั่วโมงได้ คำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$C_{\text{tank}} \frac{d\Theta_{\text{tank}}}{dt} = P_{\text{loss}} - \frac{\Theta_{\text{tank}} - \Theta_A}{R_{th}} \quad (10)$$

เมื่อ

C_{tank} คือ ความจุของถัง, (kg)

τ_{tank} คือ ค่าคงที่เวลาความร้อนถัง, (min)

k คือ ลำดับเวลา

Δt คือ ช่วงเวลาความร้อน, (hour)

2.4 แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม (Hybrid Dynamic Thermal Model) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการของสภาวะคงที่ พิจารณาร่วมกับพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาหรือเชิงพลวัต เพื่อให้สามารถประเมินอุณหภูมิถึงหม้อแปลงที่ผสมผสานหลักการของแบบจำลองชนิดนี้เริ่มจากการคำนวณค่าอุณหภูมิสมดุลปลายทางตามสภาวะคงที่ ซึ่งสะท้อนระดับอุณหภูมิของระบบภายใต้เงื่อนไขโหลดและสภาพแวดล้อมที่กำหนด จากนั้นจึงนำค่าคงที่เวลาทางความร้อนของถังมาใช้กำหนดอัตราการเปลี่ยนผ่านของอุณหภูมิจากค่าปัจจุบันไปสู่อุณหภูมิใหม่ ทำให้สามารถอธิบายลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิแบบค่อยเป็นค่อยไปของระบบความร้อนที่สามารถประเมินค่าอุณหภูมิปลายทาง และพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงผ่านได้พร้อมกัน ทำให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับโหลดจริงที่แปรผันตลอดเวลาที่สมการต่อไปนี้

บทความวิจัย (Research Article)

$$\Theta_{\text{tank}}(k) = \alpha\Theta_{\text{tank}}(k-1) + (1-\alpha)\Theta_{\text{tank,ss}}(k) \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{tank}}}{\tau_{\text{tank}} + \Delta t} \quad (15)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม Hybrid Dynamic Thermal Model (Proposed) จะได้

$$\Theta_{T,\text{hyb}}(k) = \beta\Theta_{\text{tank,ss}}(k) + (1-\beta)A \quad (16)$$

โดยที่

$$A = \alpha\Theta_{T,\text{hyb}}(k-1) + (1-\alpha)\Theta_{\text{tank,ss}}(k) \quad (17)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ จะได้

$$\begin{aligned} \Theta_{T,\text{hyb}}(k) = & [\beta + (1-\beta)(1-\alpha)]\Theta_{\text{tank,ss}}(k) \\ & + (1-\beta)\alpha\Theta_{T,\text{hyb}}(k-1) \end{aligned} \quad (18)$$

เมื่อ

$\Theta_{T,\text{hyb}}(k)$ คือ ค่าอุณหภูมิถังหม้อแปลง
เชิงพลวัตแบบผสม, ($^{\circ}\text{C}$)

β คือ สัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนัก
 $0 \leq \beta \leq 1$

แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม สัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนัก (β) ถูกใช้เพื่อปรับสมดุลระหว่างผลลัพธ์ของแบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต โดยค่า β ถูกกำหนดด้วยวิธีการปรับจูน (Parameter Tuning) ผ่านการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองกับข้อมูลอ้างอิงจากวิธี Finite Element Method (FEM) ภายใต้เงื่อนไขการจำลองเดียวกัน จากนั้นทำการปรับ

ค่า β เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ร้อยละ (APE) มีค่าน้อยที่สุด

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดสอบแบบจำลองความร้อนถังหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 MVA ระบบระบายความร้อนแบบ ONAF [19] โดยกำหนดช่วงเวลาการจำลอง (Time Step) การคำนวณแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อแสดงถึงการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้โหลดที่หลากหลาย ทั้งช่วงไม่เกิดพิกัด ช่วงระดับพิกัด และช่วงที่เกิดพิกัด โดยมีระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 MVA ที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งประกอบด้วยค่าพิกัดทางไฟฟ้า ค่าการสูญเสีย และพารามิเตอร์ทางความร้อนที่จำเป็นสำหรับการคำนวณแบบจำลอง และตารางที่ 2 แสดงช่วงการทำงานของหม้อแปลงในรูปแบบของอัตราส่วนกระแสโหลด (Per Unit) และช่วงเวลาที่ใช้ในการจำลอง เพื่อใช้เป็นอินพุตสำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มพฤติกรรมอุณหภูมิภายใต้สภาวะโหลดแปรผันตามเวลาของแบบจำลองความร้อนทั้งสภาวะคงที่เชิงพลวัต และเชิงพลวัตแบบผสม

ตารางที่ 1 ข้อมูลหม้อแปลง 25 MVA

Feature	Value	Feature	Value
Power Rated	25 MVA	$\Delta\Theta_{TO,R}$	38.3 $^{\circ}\text{C}$
Voltage HV/LV	66/11 kV	$\Delta\Theta_{H,R}$	23.5 $^{\circ}\text{C}$
Current Rated	218.7 A	Time Constant: τ_w	7 min
No-Load Losses at 75 $^{\circ}\text{C}$	17,500 W	Oil Volume	10,800 kg
Load Losses at 75 $^{\circ}\text{C}$	57,390 W	Total Losses at Rated	107,633 W

ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา และคณะ, การพัฒนาแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมสำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิถังหม้อแปลงกำลังขนาดพิกัด 25 MVA แบบ ONAF

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 1 ข้อมูลหม้อแปลง 25 MVA (ต่อ)

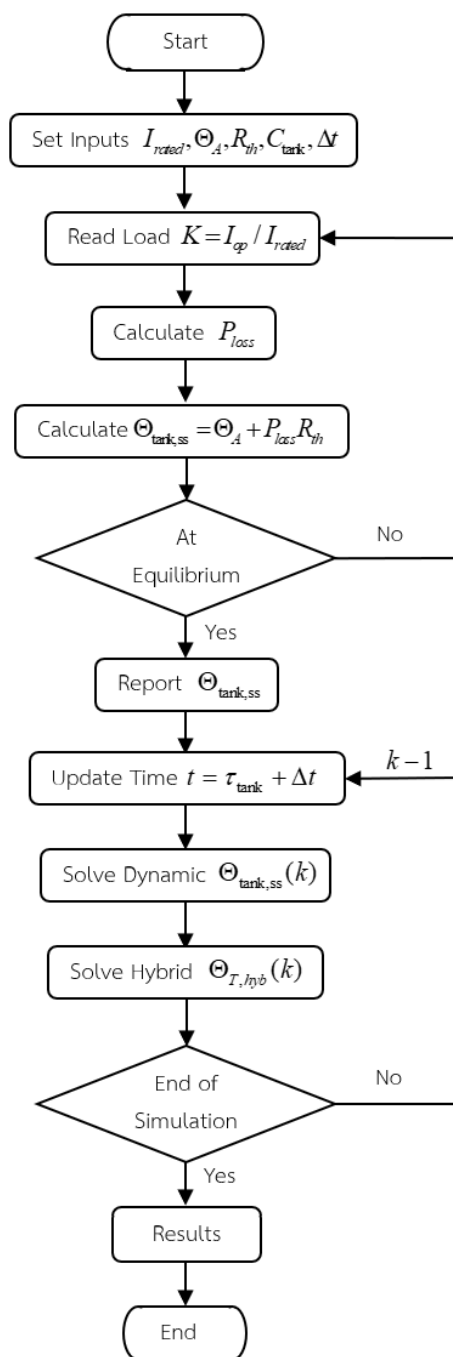
Feature	Value	Feature	Value
Cooling: Oil Natural Air Force (ONAF)	m = 0.8 n = 0.9	Ratio of load loss to no load loss (R)	5

ตารางที่ 2 ช่วงการทำงานหม้อแปลงในแบบจำลอง

ช่วงอัตราส่วน ของกระแสโหลด (K)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ช่วงเวลาการ เปลี่ยนแปลง (จำนวนข้อมูล)
1.0 pu	3	12
0.6 pu	3	12
1.5 pu	2	8
0.3 pu	3	12
1.0 pu	2	8
0.6 pu	3	12
0.8 pu	2	8
1.8 pu	1	4
1.3 pu	2	8
0.7 pu	3	12
รวม	24	96

แบบจำลองความร้อนถึงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 25 MVA ระบบระบายความร้อนแบบ ONAF โดยเชื่อมโยงระหว่างกระแสโหลดกับการเกิดความร้อนและการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างถึงหม้อแปลงเพื่อหาค่าอุณหภูมิถึงหม้อแปลง ในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงแนวทางจากมาตรฐาน IEEE C57.91 ได้มีการจำลองและเปรียบเทียบอุณหภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่เหมือนกัน เพื่อประเมินความถูกต้องของวิธีการคำนวณตามสมการที่นำเสนอ ในการศึกษาขึ้น

กำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ที่ 28 °C และกำหนดช่วงการทำงานของหม้อแปลงในทั้งสองแบบจำลองให้สอดคล้องกัน



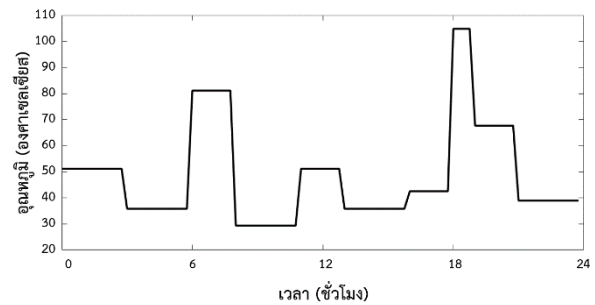
รูปที่ 2 แผนภาพกระบวนการจำลองความร้อนถึงหม้อแปลงไฟฟ้า

บทความวิจัย (Research Article)

ขั้นตอนการจำลองเชิงเวลาดังรูปที่ 2 ได้กำหนดช่วงเวลาในการคำนวณทุก ๆ 15 นาที ตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของโหลดในลักษณะกึ่งต่อเนื่อง และสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้า เวกเตอร์เวลาถูกกำหนดในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time Vector) โดยอาศัยกระบวนการจำลองเชิงเวลาแบบขั้นบันได (Time-Stepping Simulation) ซึ่งกำหนดขนาดช่วงเวลาคงที่เท่ากับ 15 นาที ส่งผลให้ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง มีข้อมูลทั้งหมด 96 จุด ทั้งนี้เวกเตอร์เวลาดังกล่าวถูกจัดให้สอดคล้องกับจำนวนข้อมูลโหลด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตตามลำดับเวลา จากนั้นจึงใช้ค่าความต้านทานความร้อนรวมจากข้อมูลหม้อแปลงและค่าความจุความร้อนถึง ทำให้ได้ค่ากำลังสูญเสียที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน ผลลัพธ์ค่าอุณหภูมิถึงจะเริ่มที่การคำนวณอุณหภูมิถึงแบบสภาวะคงที่ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล แล้วจึงใช้วิธีการคำนวณอุณหภูมิถึงแบบพลวัต เพื่อสะท้อนพฤติกรรมตอบสนองเชิงเวลา เงื่อนไขการวนรอบสำหรับแต่ละช่วงเวลา ได้กำหนดเวกเตอร์เวลาให้สอดคล้องกับจำนวนข้อมูลโหลด [20,21] ตรวจสอบว่า k เท่ากับจำนวนข้อมูล N หรือไม่ หากไม่ใช่ระบบจะเพิ่มเวลาและทำซ้ำขั้นตอน แต่ถ้าหากใช่ ถือเป็นการสิ้นสุดการจำลอง

4. ผลเปรียบเทียบการจำลองอุณหภูมิถึงหม้อแปลง

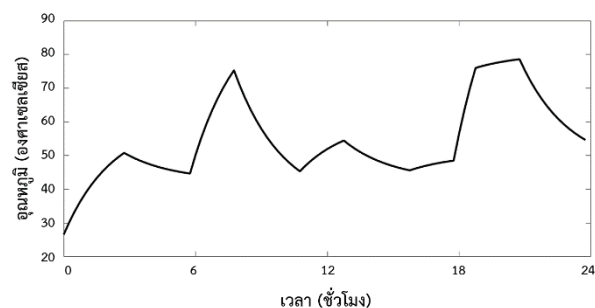
การจำลองหาค่าอุณหภูมิของหม้อแปลงขนาดพิกัด 25 MVA ภายใต้สภาวะโหลดตามช่วงการทำงานหม้อแปลงในแบบจำลอง ซึ่งมีการแปรผันของโหลดอยู่ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ที่เปรียบดังการทำงานของหม้อแปลงที่มีลักษณะการจ่ายโหลดที่ต่ำสุด 0.3 pu และที่สูงสุด 1.8 pu ได้ผลการจำลองดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3 แบบจำลองความร้อนสภาวะคงที่

รูปที่ 3 แสดงผลการจำลองอุณหภูมิถึงหม้อแปลงแบบสภาวะคงที่ ซึ่งพิจารณากำลังสูญเสียรวมและความสามารถในการระบายความร้อนของระบบ จะเห็นว่าอุณหภูมิถึงจะเปลี่ยนค่าทันทีตามระดับโหลดที่เกิดขึ้น และเข้าสู่ค่าคงตัวใหม่โดยไม่พิจารณาพฤติกรรมของการเปลี่ยนผ่านตามเวลา ซึ่งแบบจำลองนี้สะท้อนแนวโน้มอุณหภูมิปลายทางของระบบเมื่อเข้าสู่ค่าความร้อน

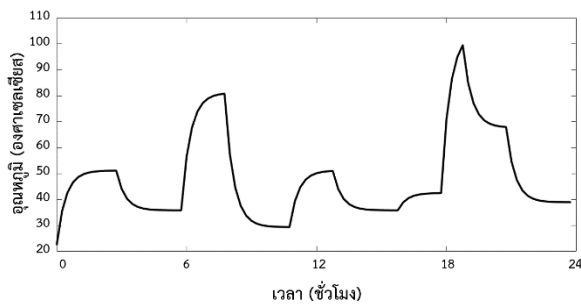
ผลการจำลองอุณหภูมิถึงหม้อแปลงโดยใช้แบบจำลองเชิงพลวัต แบบจำลองนี้ได้พิจารณาผลของค่าคงที่เวลาความร้อนของถัง ส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะแบบเลขชี้กำลัง เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นหรือลดลง แบบจำลองนี้สะท้อนพฤติกรรมการสะสมและการระบายความร้อนของถังหม้อแปลงแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต

บทความวิจัย (Research Article)

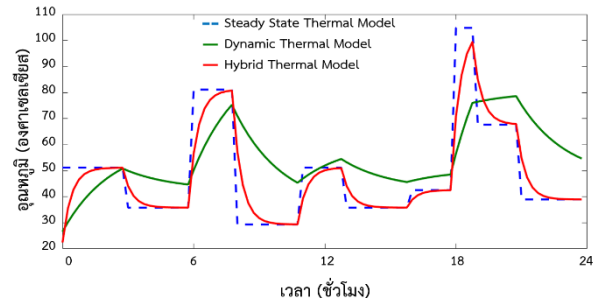
ผลการจำลองอุณหภูมิถึงหม้อแปลงเชิงพลวัตแบบผสม ซึ่งเป็นการรวมข้อดีของแบบจำลองสถานะคงที่ และแบบจำลองเชิงพลวัต โดยพิจารณาสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักในการปรับสมดุลระหว่างค่าปลายทางและผลตอบสนองเชิงเวลา ทำให้สามารถประเมินทั้งค่าอุณหภูมิสมดุลและพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงได้พร้อมกัน ส่งผลให้ผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับลักษณะโหลดที่แปรผันตามเวลามากยิ่งขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 5



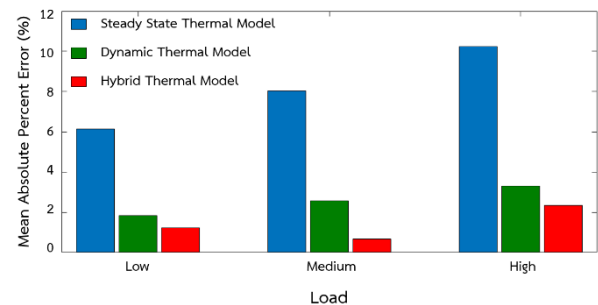
รูปที่ 5 แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม

ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงหม้อแปลงที่ได้จากแบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม ภายใต้สภาวะโหลดแปรผันตามเวลา พบว่าแบบจำลองความร้อนสถานะคงที่ให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบทันทีตามระดับโหลด โดยไม่มีพฤติกรรมการสะสมความร้อน ขณะที่แบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตมีลักษณะการเพิ่มและลดอุณหภูมิไปตามค่าคงที่เวลาความร้อนของระบบ ส่วนแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมให้ผลลัพธ์ที่อยู่ระหว่างสองแบบจำลอง โดยสามารถสะท้อนทั้งค่าอุณหภูมิปลายทางและมีลักษณะการตอบสนองเชิงเวลาได้อย่างเหมาะสม โดยพบว่าแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสมมีแนวโน้มสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของการถ่ายเทความร้อนของหม้อแปลงมากกว่า และช่วยลดค่า

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณแบบสภาวะคงที่เพียงอย่างเดียว แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงหม้อแปลงจากแบบจำลองความร้อนทั้ง 3 แบบ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากแบบจำลองความร้อนในแต่ละช่วงโหลด

รูปที่ 7 เปรียบเทียบแบบจำลองที่ให้ผลลัพธ์ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ต่ำ และมีผลใกล้เคียงกันในการทดสอบแต่ละช่วงโหลด โดยเลือกแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัต และแบบจำลองความร้อนเชิงพลวัตแบบผสม มาใช้ทดสอบเปรียบเทียบการคำนวณอุณหภูมิถึงหม้อแปลง กับวิธีการ Finite Element Method (FEM) โดยคำนวณจากการเพิ่มกำลังสูญเสียในขดลวด (Copper Losses) ตั้งแต่ 0 ถึง 57,390 W ตามพิกัดหม้อแปลง เป็นการให้ความร้อนที่เกิดขึ้นใน

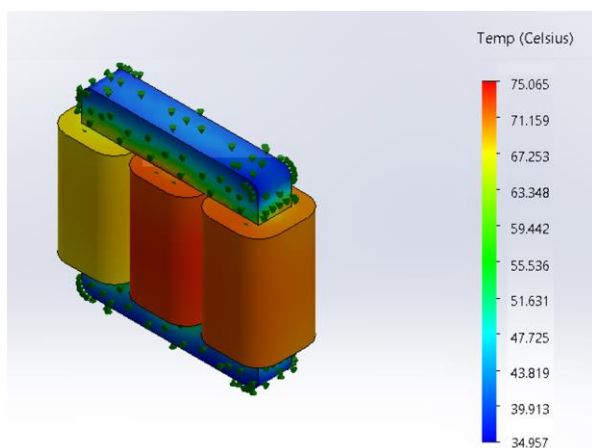
บทความวิจัย (Research Article)

ขดลวดถ้ายโอนไปน้ำมันและตัวถัง ภายใต้สภาวะ
อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ [22-25] คำนวณตามมาตรฐาน

IEEE C57.91 เพื่อทดสอบการคำนวณของแบบจำลอง
และลดปัจจัยผันผวนภายนอก แสดงผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงโหลด

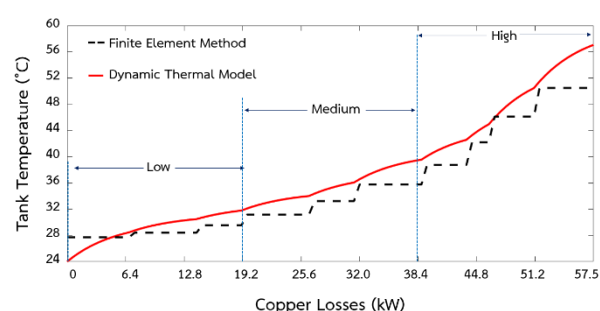
Mean Data	Copper Losses (kW)		
	Low 0.0 – 19.2	Medium 19.2 – 38.4	High 38.4 – 57.5
FEM (°C)	28.75	32.63	46.20
Dynamic (°C)	28.23	33.47	47.73
Hybrid (°C)	28.40	32.85	47.29
Dynamic APE (%)	1.83	2.57	3.31
Hybrid APE (%)	1.24	0.66	2.35



รูปที่ 8 การทดสอบหม้อแปลงด้วยวิธี FEM

รูปที่ 8 เป็นวิธีการ Finite Element Method (FEM) เพิ่มกำลังสูญเสียในขดลวด เพื่อความร้อนขดลวดจะถ้ายโอนไปน้ำมันและตัวถัง ภายใต้สภาวะอุณหภูมิแวดล้อมคงที่ จนถึงกำลังสูญเสียขดลวดสูงสุดที่ 57.5 kW ให้อุณหภูมิขดลวดตามพิกัดหม้อแปลง 75°C ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าความร้อนของ

ขดลวดเป็นการแผ่กระจายที่ขดลวดชุดกลางที่ร้อนที่สุดไปหาขดลวดสองชุดด้านข้าง เมื่อค่าขดลวดร้อนถึง 75°C แล้วจึงนำค่าอุณหภูมิถึงจากวิธี FEM ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Dynamic Model และ Hybrid Dynamic Model ที่นำเสนอ

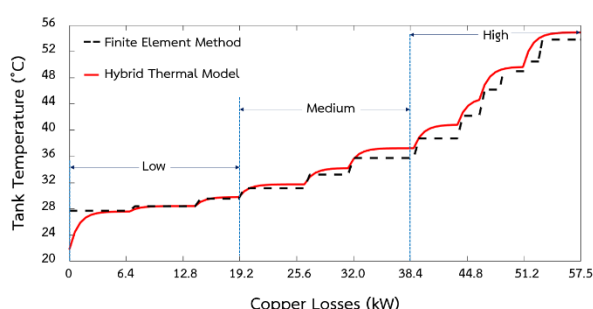


รูปที่ 9 การทดสอบเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงระหว่าง Dynamic Model และ FEM

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงหม้อแปลงที่ได้จากวิธี FEM กับแบบจำลอง Dynamic Thermal Model ผลการทดสอบเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า

บทความวิจัย (Research Article)

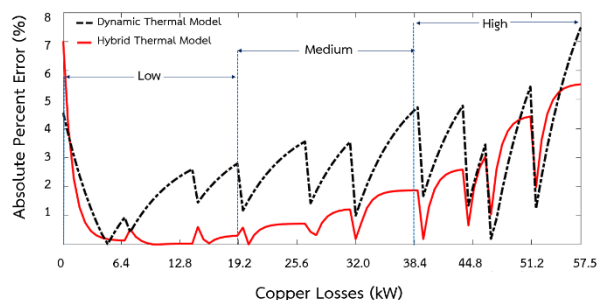
แบบจำลอง Dynamic Thermal Model ประมาณค่าอุณหภูมิถึงที่ยังไม่สะท้อนแนวโน้มของอุณหภูมิในช่วงสภาวะคงที่ และแบบจำลองยังมีความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่โหลดสูง จากการเพิ่มกำลังสูญเสียขดลวด ซึ่งยังไม่สอดคล้องกันกับวิธี FEM ที่มีอุณหภูมิแบบสภาวะคงที่และอุณหภูมิแบบสภาวะเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 10 การทดสอบเปรียบเทียบอุณหภูมิถึงระหว่าง Hybrid Model และ FEM

รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบพบว่าอุณหภูมิถึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบกึ่งเชิงเส้นตามระดับกำลังสูญเสีย โดยค่าที่ได้จาก Hybrid Dynamic Model มีแนวโน้มสอดคล้องกับ FEM ในช่วงกำลังสูญเสียต่ำถึงปานกลาง และเริ่มมีความแตกต่างเพิ่มขึ้นในช่วงกำลังสูญเสียสูง ทั้งนี้ความแตกต่างดังกล่าวแสดงว่า FEM ให้ผลลัพธ์ที่สะท้อนพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนเชิงพื้นที่ได้อย่างละเอียด ขณะที่ Hybrid Dynamic Model มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากความร้อนที่สะสมก่อนหน้ามาใช้คำนวณด้วย

งานวิจัยนี้ได้ประเมินค่าความคลาดเคลื่อน Absolute Percentage Error (APE) ของอุณหภูมิถึงแบบจำลอง Dynamic Model เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Hybrid Dynamic Model ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิถึง APE ระหว่าง Dynamic Model และ Hybrid Model

รูปที่ 11 การประเมินค่าความคลาดเคลื่อน APE ของอุณหภูมิถึงพบว่าช่วงโหลดต่ำ แบบจำลอง Dynamic Thermal Model ช่วงเริ่มต้นคำนวณมีค่า 4.5% จากการคำนวณที่ช่วงแรกค่าความคลาดเคลื่อนยังมีผลจากไม่คิดสภาวะคงที่ ทำให้มีช่วงเริ่มต้นแตกต่างเมื่อเทียบกับ Hybrid Dynamic Model ที่ช่วงเริ่มต้นคำนวณมีค่าสูง 7% จากการที่ต้องใช้ค่าอุณหภูมิสภาวะคงที่มาใช้คำนวณเริ่มต้น ถ้าหากไม่กำหนดค่านี้ก็จะใช้เวลาคำนวณช่วงเวลานึงจึงจะสามารถเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิแวดล้อมเป็นค่าเริ่มแรกแล้วจึงสามารถคำนวณหาอุณหภูมิช่วงต่อไปได้ และเมื่อเทียบที่ช่วงโหลดปานกลาง Hybrid Dynamic Model มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าและแม่นยำกว่าจนถึงช่วงค่ากำลังสูญเสียที่ทดสอบมีค่าสูงขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองแบบจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกันบางช่วง

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองความร้อนถึงหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดพิกัด 25 MVA ระบบระบายความร้อนแบบ ONAF โดยเปรียบเทียบแบบจำลอง 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองสภาวะคงที่แบบจำลองเชิงพลวัต และแบบจำลองเชิงพลวัตแบบ

บทความวิจัย (Research Article)

ผสม การทดสอบแบบจำลองได้กำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ที่ 28 °C เพื่อควบคุมตัวแปรภายนอกและมุ่งเน้นในส่วนการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดต่ออุณหภูมิถึงหม้อแปลงโดยตรง ทั้งนี้แม้ว่าในสภาวะการใช้งานจริงอุณหภูมิแวดล้อมจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่การกำหนดค่าคงที่จะช่วยลดความซับซ้อนของแบบจำลองแต่ละแบบและทำให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการคำนวณแบบจำลองแต่ละวิธีได้ อย่างไรก็ตาม สามารถนำแบบจำลองที่นำเสนอขยายไปสู่กรณีที่วัดและเก็บผลอุณหภูมิแวดล้อมที่แปรผันตามเวลาจริงในงานวิจัยในอนาคตได้

ผลการจำลองพบว่า แบบจำลองสภาวะคงที่สามารถแสดงแนวโน้มค่าอุณหภูมิปลายทางได้ แต่ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมการเปลี่ยนผ่านตามเวลาได้อย่างเหมาะสม ขณะที่แบบจำลองเชิงพลวัตสามารถอธิบายลักษณะการสะสมและการระบายความร้อนของถังหม้อแปลงได้ดีขึ้น ซึ่งอย่างไรก็ตามแบบจำลองเชิงพลวัตแบบผสมสามารถผสานข้อดีของทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน ทำให้สามารถประเมินทั้งค่าอุณหภูมิสมดุลและพฤติกรรมการตอบสนองเชิงเวลาได้อย่างสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณของ Hybrid Dynamic Model กับวิธี Finite Element Method (FEM) ภายใต้การเพิ่มกำลังสูญเสียในโหลดตั้งแต่ 0 ถึง 57.39 kW พบว่าแนวโน้มอุณหภูมิถึงเพิ่มขึ้นตามกำลังสูญเสียอย่างต่อเนื่อง จากผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ร้อยละ (Absolute Percentage Error: APE) พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการคำนวณมีค่าสูงกว่าช่วงเวลาถัดไป ทั้งนี้สาเหตุเกิดจากเงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลอง ที่กำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นจากสภาวะคงที่ หรือค่าการประมาณเบื้องต้นจะยังไม่สอดคล้องกับสภาวะสมดุลเชิงพลวัตของระบบ ส่งผลให้การตอบสนองของอุณหภูมิในช่วง

เริ่มต้นมีความคลาดเคลื่อนก่อนที่จะค่อย ๆ ลดเข้าสู่ค่าที่เสถียรขึ้น

ผลกระทบของความคลาดเคลื่อนในช่วงเริ่มต้นสามารถพิจารณาแนวทางการชดเชยได้หลายวิธี เช่น การกำหนดค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น การใช้ข้อมูลจากช่วงเวลาก่อนหน้า หรือการละเว้นข้อมูลช่วงเริ่มต้น ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณในช่วงเวลาถัดไป พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ร้อยละ APE มีแนวโน้มลดลงและคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม (ไม่เกิน 5%) ซึ่งสะท้อนว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมทางความร้อนของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภายหลังจากช่วงเริ่มต้น โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระยะแรกไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องโดยรวมของแบบจำลอง อีกทั้งค่า APE ที่อยู่ในเกณฑ์ดังกล่าวยังยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการประเมินเชิงวิศวกรรมและการประยุกต์ใช้งานจริง

นอกจากนี้ รูปแบบโหลดที่ใช้ในการทดสอบเป็นรูปแบบที่กำหนดขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของแบบจำลอง โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้เงื่อนไขที่มีการควบคุม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาปัจจัยภายนอกที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมความร้อนของหม้อแปลงเมื่อเทียบกับข้อมูลจากการวัดจริงในระบบไฟฟ้า เช่น อุณหภูมิแวดล้อมที่แปรผัน ความเร็วลม การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ และการเสื่อมสภาพของวัสดุฉนวน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้อาจมีอิทธิพลต่อความแม่นยำของแบบจำลองเมื่อนำไปใช้งานในสภาวะจริง ดังนั้น ในการพัฒนาต่อในอนาคต ควรมีการนำข้อมูลจากการวัดจริงมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง และปรับเทียบแบบจำลอง โดยคำนึงถึงสภาพแวดล้อมและเงื่อนไขการใช้งานจริงของหม้อแปลง เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของแบบจำลองใน

บทความวิจัย (Research Article)

การใช้งานภาคสนามต่อไปที่รวมอุณหภูมิแวดล้อม
และสภาพการทำงานจริงของหม้อแปลงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำการวิจัยขอขอบคุณวิทยาลัย
เชียงราย ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย และเอื้อเพื่อ
ช่วยเหลือในการดำเนินงานเพื่อให้การดำเนินงานวิจัย
ลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Jin, D. Kim, A. Abu-Siada, and S. Kumar, "Oil-immersed power transformer condition monitoring methodologies: A review," *Energies*, vol. 15, no. 9, p. 3379, 2022.
- [2] P. Goscinski, Z. Nadolny, R. Nawrowski, and T. Boczar, "The tools and parameters to consider in the design of power transformer cooling systems," *Energies*, vol. 16, no. 24, p. 8000, 2023.
- [3] M. C. Nitu, I. D. Nicolae, L. A. Dina, and P. M. Mircea, "Power transformer inrush current analysis: Simulation, measurement and effects," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 23, p. 10926, 2024.
- [4] M. S. Seddik, M. B. Eteiba, and J. Shazly, "Evaluating the harmonic effects on the thermal performance of a power transformer," *Energies*, vol. 17, no. 19, p. 4871, 2024.
- [5] I. Smolyanov, E. Shmakov, D. Butusov, and A. I. Khalyasmaa, "Review of modeling approaches for conjugate heat transfer processes in oil-immersed transformers," *Computation*, vol. 12, no. 5, p. 97, 2024.
- [6] M. Mukhammadjonov et al., "Modeling and predicting the thermal state of a transformer through an adaptive intelligent approach," *Vibroengineering Procedia*, vol. 60, pp. 626–633, Dec. 2025.
- [7] L. Yang, M. Wang, L. Chen, F. Zhang, S. Ma, Y. Zhang, and S. Yang, "Method for predicting transformer top oil temperature based on multi-model combination," *Electronics*, vol. 14, no. 14, p. 2855, 2025.
- [8] M. S. Seddik, J. Shazly, and M. B. Eteiba, "Thermal analysis of power transformer using 2D and 3D finite element method," *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3203, 2024.
- [9] C. Gao, L. Huang, Y. Feng, E. Gao, Z. Yang, and K. Wang, "Thermal field modeling and characteristic analysis based on oil-immersed transformer," *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, no. 1, 2023.
- [10] R. Sitar, I. Šulc, and Ž. Janić, "Prediction of local temperature rise in power transformer tank by FEM," *Procedia Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 231–239, 2017.

บทความวิจัย (Research Article)

- [11] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators, IEEE Std C57.91-2011, 2011.
- [12] M. Ishak and Z. Wang, "Transformer hotspot temperature calculation using IEEE loading guide," in *Proceedings of International Conference Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2008)*, 2008, pp. 1017–1020.
- [13] L. H. Medeiros, M. M. Oliveira, C. E. G. Falcão, V. C. Bender, and T. B. Marchesan, "Thermal-hydraulic network model for steady-state thermal analysis and design of power transformer magnetic cores," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 64, 2024.
- [14] Y. Hu, L. Wang, J. Li, H. Weng, Z. Zheng, G. Wen, and F. Zhang, "Predicting the temperature rise in oil-immersed transformers based on the identification of thermal circuit model parameters," *Energies*, vol. 18, no. 17, p. 4707, 2025.
- [15] S. A. Almohaimeed and S. Suryanarayanan, "Steady-state analysis of the impact of temperature variations on a distribution transformer," in *Proceedings of North American Power Symposium. (NAPS)*, Morgantown, WV, USA, 2017, pp. 1–5.
- [16] L. Jauregui-Rivera and D. J. Tylavsky, "Acceptability of four transformer top-oil thermal models Part I: Defining metrics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 860–865, Apr. 2008.
- [17] L. Jauregui-Rivera and D. J. Tylavsky, "Acceptability of four transformer top-oil thermal models Part II: Comparing metrics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 866–872, Apr. 2008.
- [18] D. Susa, M. Lehtonen, and H. Nordman, "Dynamic thermal modelling of power transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 197–204, Jan. 2005.
- [19] O. Gouda, G. Amer, and W. A. A. Salem, "Predicting transformer temperature rise and loss of life in the presence of harmonic load currents," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 113–121, 2012.
- [20] D. Zou, H. Xu, H. Quan, J. Yin, Q. Peng, S. Wang, W. Dai, and Z. Hong, "Top-oil temperature prediction of power transformer based on long short-term memory neural network with self-attention mechanism optimized by improved whale optimization algorithm," *Symmetry*, vol. 16, no. 10, p. 1382, 2024.
- [21] M. Novkovic, Z. Radakovic, F. Torriano, and P. Picher, "Proof of the concept of detailed dynamic thermal-hydraulic network model of liquid-immersed power transformers," *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 3808, 2023.

บทความวิจัย (Research Article)

- [22] M. Xu, B. Shang, N. Zhou, W. Wang, X. Dong, Y. Li, and J. Ruan, “Research on transformer hot-spot temperature inversion method under three-phase unbalanced conditions,” *Energies*, vol. 18, no. 16, p. 4422, 2025.
- [23] T. Orosz, “FEM-based power transformer model for superconducting and conventional power transformer optimization,” *Energies*, vol. 15, no. 17, p. 6177, 2022.
- [24] Q. Gao, Z. Zhang, and D. Liu, “Thermal behavior of a buoyancy-driven oil-immersed transformer and coolant performance assessment,” *Case Studies in Thermal Engineering*, 2026.
- [25] D. Darzhanova and I. Iatcheva, “Investigation of the temperature field distribution in an EI type iron-cored coil using 3D FEM modeling at different load conditions,” *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4581, 2023.