

การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกลำดับ $2k\pm 1$ ต่ออายุการใช้งานของ หม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน

A Study on the Impact of $2k\pm 1$ Harmonic Components on the Lifetime of Oil-Immersed Transformers

สิริวิช ทัดสวน และ ชนภัช เดชนาราพัฒน์*

Siriwich Tadsuan and Shanaphat Dechnaraphat*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

*ผู้พิมพ์ประสานงาน อีเมล : Shanaphatd@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 27 กันยายน 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 1 พฤศจิกายน 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 : 13 พฤศจิกายน 2568

วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 14 พฤศจิกายน 2568

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้ได้มีการแนะนำผลกระทบของฮาร์โมนิกลำดับ $2k\pm 1$ ที่มีต่อการลดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เกิดจากอุณหภูมิจุดร้อนที่สูงเกินไป ในขั้นตอนแรก ได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิฉนวนด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนของขดลวดหม้อแปลง ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาเสนอไว้ ขั้นตอนต่อมาได้ทำการจำลองวัฏจักรโหลดของหม้อแปลงภายใต้สภาวะการทำงานเกินพิกัด โดยมีกระแสมูลฐานตั้งแต่ 110% ถึง 150% ของค่าพิกัด ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมจากจังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งบันทึกโดยกรมอุตุนิยมวิทยาสถานีหมายเลข 450201 ถูกนำมาใช้ในการจำลอง ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับกระแสเกินพิกัด 150% ค่าอุณหภูมิฉนวนด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนมีค่าสูงเกินขีดจำกัดที่กำหนด ส่งผลให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงเหลือเพียง 0.72 ปี ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลที่สำคัญของฮาร์โมนิกต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนของหม้อแปลง และให้ข้อมูลเชิงลึกที่เป็นประโยชน์ต่อการป้องกันความเสียหายของฉนวน รวมถึงการเพิ่มความมั่นคงและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าในระยะยาว

คำสำคัญ : อายุหม้อแปลง, ฮาร์โมนิก, หม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน, จุดร้อนสุด

Abstract This paper investigates the impact of $2k\pm 1$ harmonic components on the lifetime reduction of oil-immersed power transformers, aiming to prevent insulation degradation caused by excessive hot-spot temperatures. In the first stage, the top-oil and winding hot-spot temperatures were experimentally measured. The obtained results showed good agreement with the proposed mathematical model. In the second stage, transformer load cycles under overloading conditions were simulated, with the fundamental current ranging from 110% to 150% of the rated current. Ambient temperature data from Kanchanaburi Province, recorded by Meteorological Department Station No. 450201, were employed in the simulation. The results indicate that at 150% overloading, both the top-oil and hot-spot temperatures exceeded the permissible limits, leading to a reduction in transformer lifetime to only 0.72 years. These findings highlight the significant influence of harmonic distortion

on transformer thermal aging and provide useful insights for preventing insulation failure and improving long-term power system reliability and planning.

Keywords : Lifetime of Transformer , Harmonic, Oil-immersed transformer, Hottest-spot

1. บทนำ

ปัจจุบันภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น เช่น หลอดไฟฟ้าแบบหลอด LED เครื่องชาร์จประจุรถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น ผลกระทบที่ตามมาคือทำให้เกิดสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังเพิ่มมากขึ้นตาม ส่งผลทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การเกิดรีโซแนนซ์ทำให้เกิดการระเบิดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้ในการแก้ตัวประกอบกำลัง[1] ความร้อนที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรไฟฟ้าต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า [2],[3] มอเตอร์ไฟฟ้า[4] อื่นๆ จากงานวิจัย[5] ได้ทำการทดสอบผลกระทบในเรื่องความร้อนที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการใช้กระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส จาก[6],[7] ได้เปลี่ยนรูปแบบภาระไฟฟ้ามาเป็นแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 1 เฟส จำนวน 3 ชุด โดยค่าอุณหภูมิที่ทดสอบได้มีค่าสูงกว่า[5] สาเหตุอันเนื่องจากเกิดค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย อันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่ขดลวดมีค่ามากกว่า(โดยงานวิจัย[5] และ [6],[7]ได้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันตัวเดียวกัน) โดยการทดสอบกำหนดให้กระแสไฟฟ้าคลื่นมูลฐาน (I_{h1}) ของการทดสอบทั้ง 2 แบบมีค่าประมาณเท่ากับกระแสฟลักหม้อแปลง(15.2A) ผลลัพธ์ที่ได้ค่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกและความร้อนของภาระไฟฟ้าแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 1 เฟส จำนวน 3 ชุด มีค่าสูงกว่าสาเหตุอันเนื่องมาจากการใช้ไฟฟ้าแบบนี้จะมีกลุ่มฮาร์มอนิกประเภท $2K \pm 1$ อันได้แก่กระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขที่ (3, 5, 7, 9, 11.....) ที่มีขนาดสูง ส่งผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดมีค่าปริมาณมาก แต่ภาระไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส จะมีกลุ่มฮาร์มอนิก

ประเภท $6K \pm 1$ ได้แก่ ฮาร์มอนิกลำดับเลขที่ 5, 7, 11, 13, 17, 19... ค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้เกิดอายุที่สูญเสียเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลทำให้เกิดอายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง[8],[9] จากงานวิจัย[5] ได้ทำการจำลองการทำงานของหม้อแปลงในสภาวะเกินพิกัดในช่วงเวลา 8.00น– 18.00น ซึ่งเป็นช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่าช่วงกลางวัน โดยกำหนดให้ภาระไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส ($I_{h1}=150\%$ ของพิกัด $I_{rms} = 167.88\%$) ผลลัพธ์ที่ได้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงเหลือ 9.57 ปี (โดยปกติมีการเสื่อมสลายตามธรรมชาติที่ 20ปี[8]) จุดที่น่าสนใจคือจาก[6],[7] เป็นการทดสอบและคำนวณที่กระแสมูลฐานที่พิกัดเท่านั้นไม่สามารถทดสอบในสภาวะเกินพิกัดในช่วงระยะเวลาอันได้ สาเหตุอันเนื่องมาจากการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลง ด้วยเหตุนี้การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวงานวิจัยนี้จะป็นทางออกที่ดี ทำให้ทราบค่าอุณหภูมิต่างๆ และอายุของหม้อแปลง ประโยชน์ที่ได้รับทำให้สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายและช่วยในการวางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้าล่วงหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังเช่น ในการขยายการใช้พลังงานของแต่ละเขตพื้นที่ของการไฟฟ้า การใช้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถตัดสินใจได้ว่าหม้อแปลงที่มีอยู่เดิมแล้วเพียงพอกับการใช้ไฟฟ้าประเภทไม่เป็นเชิงเส้นได้หรือไม่ ถ้าไม่เพียงพอจำเป็นต้องเพิ่มที่ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่าไร

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อายุของฉนวน

อุณหภูมิและเวลาจะเป็นตัวกำหนดอายุของฉนวน ค่าของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆ ของฉนวนจะมีค่าไม่เท่ากัน บริเวณจุดร้อนสุดจะได้รับความ

เสื่อมสภาพมากกว่าบริเวณอื่นๆ ดังนั้นการศึกษาอายุของฉนวนจะพิจารณาอุณหภูมิที่จุดร้อนสุด จาก[10]-[12]สามารถคำนวณอายุใช้งานของหม้อแปลงดังสมการที่(1) และสมการที่(2)

$$\text{Life} = \frac{1}{\text{Total Loss of Life}} = \frac{1}{\left(\sum_{t=1}^{t=n} 10^{-\left(\frac{A+B}{T_i} \right)} \right)} \quad (1)$$

เมื่อ

$$T_i = \Theta_h + 273 \quad (2)$$

Θ_h คืออุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของตัวนำ, °C

A, B คือค่าคงที่ โดยมีค่าต่างๆ ดังตารางที่ 1[10]-[12]

ตารางที่1 ค่าพารามิเตอร์ A และ B ของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน ตามมาตรฐานANSI/IEEE [10]-[12]

ขนาดหม้อแปลง	อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด, °C	A	B
หม้อแปลงขนาด500 kVA และต่ำกว่า	65	-11.269	6328.8
	55	-11.968	6328.8
หม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA – 100 MVA	65	-30.834	16054.0
	55	-32.543	16054.0
หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 100 MVA	65	-13.391	6972.15

2.2 อุณหภูมิหม้อแปลงเมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นและอุณหภูมิแวดล้อม

จาก[13] ได้คำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันชนิดONAN ดังสมการที่(3) และค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลง เช่น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน ค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็กอื่นๆ ได้จาก [13]-[17] ซึ่งแสดงดังสมการที่(4) ถึงสมการที่(5)

ที่สภาวะคงตัว

$$\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[\frac{P_T}{P_{TR}} \right]^{0.8} \quad (3)$$

$$P_{TR} = P_{CuR} + P_{coreR} + P_{tan kR} \quad (4)$$

เมื่อ

Θ_{ou} คืออุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายน้ำมันด้านบนที่ใดๆ, °C

Θ_{or} คืออุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด, °C

P_T คือกำลังสูญเสียรวม,W

P_{TR} คือกำลังสูญเสียรวมที่พิกัด, W

P_{CuR} คือกำลังสูญเสียที่ขดลวดที่พิกัดหม้อแปลง,W

P_{coreR} คือกำลังสูญเสียแกนเหล็กที่พิกัดหม้อแปลง,W

$P_{tan kR}$ คือกำลังสูญเสียที่ถังหม้อแปลงที่พิกัดหม้อแปลง, W

ถ้า P_T กรณีที่มีภาระไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีค่ามากกว่า กรณีที่ภาระไฟฟ้าเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งจะหาได้จากสมการที่(5)

$$P_T = P_{LL}(\text{total}) + P_{coreR} + P_{tan kR} \quad (5)$$

เมื่อ P_{coreR} และ $P_{tan kR}$ มีค่าน้อยกว่า $P_{LL}(\text{total})$ มากสามารถละเลยได้ ดังนั้น

$$P_{LL}(\text{total}) = \sum_{h=1}^{h=\max} (I_h)^2 \cdot R_h \quad (6)$$

$P_{LL}(\text{total})$ คือกำลังสูญเสียรวมขณะมีโหลด, W

I_h คือกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพของฮาร์โมนิกลำดับ h, A

R_h คือความต้านทานที่ฮาร์โมนิกลำดับ h, Ω

และจาก [10] ที่สภาวะชั่วคราว

$$\Theta_{ot} = \Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (7)$$

Θ_{oi} คืออุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นน้ำมันด้านบน, °C

Θ_{ot} คืออุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆในสถานะชั่วคราว, °C

τ คือค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัว, ชั่วโมง

t คือช่วงเวลาการต่อโหลดของหม้อแปลง, ชั่วโมง

จาก[5], [7]

$$\Theta_{gu} = \left[\frac{\left[(I_{rms})^2 R_{dc} \right] + \left[P_{ecw_H} \times \left(\frac{P_{ecw}}{P_{ecw_R}} \right) \right]}{\left[(I_{rms_R})^2 R_{dc} \right] + P_{ecw_H}} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (8)$$

Θ_{gu} คืออุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายของจุดร้อนสูงสุดของตัวนำที่

มากกว่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่ทุกๆ โหลด, °C

I_{rms} คือกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล, A

I_{rms_R} คือกระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่พิกัดหม้อแปลง, A

R_{dc} คือความต้านทานกระแสตรง, Ω

P_{ecw_R} คือกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่

ขดลวดที่พิกัด, W

P_{ecw_H} คือกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่จุดร้อนสูงสุด, W

เมื่อ

$$P_{ecw} = P_{LL(total)} - (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} - P_{OSL} \quad (9)$$

P_{OSL} คือกำลังสูญเสียปลั๊กย่อยอื่น ๆ นอกเหนือจากขดลวด, W

จากสมการที่(9) ค่า P_{OSL} มีค่าน้อย ซึ่งสามารถละเลยได้ ดังนั้น

$$P_{ecw} = P_{LL(total)} - (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} \quad (10)$$

P_{ecw} คือกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขดลวด, W

เมื่อรวมสมการที่(7) กับสมการที่(8) จะได้อุณหภูมิเพิ่มของจุดร้อนสูงสุดและอุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันแสดงได้ดังสมการที่(11) และสมการที่(12) เรียงตามลำดับ

$$\Theta_{hrise} = \Theta_{ot} + \Theta_{gu} \quad (11)$$

$$\Theta_h = \Theta_{hrise} + \theta_a \quad (12)$$

Θ_{hrise} คืออุณหภูมิเพิ่มที่จุดร้อนสูงสุดของตัวนำ, °C

θ_a อุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันไซน์สองชั้น, °C

อุณหภูมิแวดล้อมรอบๆ หม้อแปลงมีผลกับอายุของหม้อแปลง จาก[18]ได้มีการหาค่าอุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันไซน์สองชั้น (Double sinusoidal, θ_a) ดังสมการที่(13)

$$\theta_a = \theta_{ay} + A \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} (\text{day} - D_x) \right] + B \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{24} (\text{hour} - T_x) \right] \quad (13)$$

θ_{ay} คืออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยต่อปี °C

A คือขนาดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงประจำปีของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิประจำวัน °C

B คือขนาดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงประจำวัน, °C

D_x คือวันที่ร้อนที่สุดประจำปี

T_x คือชั่วโมงที่ร้อนที่สุดประจำวัน(ประมาณเวลา 14.00 น.)

day คือวันที่ต้องการแสดงผลอุณหภูมิ

hour คือ ชั่วโมงที่ต้องการแสดงผลอุณหภูมิ

3. การวางแผนการจ่ายภาระไฟฟ้าหม้อแปลง

3.1 การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ

ในงานวิจัยนี้มีสมมุติฐานในเรื่องของอุณหภูมิจุดร้อนสุดมีค่าแปรตามกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนของฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ดังสมการที่(6) แต่สิ่งที่จำเป็นต้องทราบก็คือค่าความต้านทานขดลวดที่ความถี่ไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งมีเหตุมาจากการเกิดปรากฏการณ์ที่ผิวตัวนำ(Skin effect) จากงานวิจัย[5],[7] ได้ทดสอบหาค่าความต้านทานของวงจรสมมูลที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ($R_{eq(ac)}$) ที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 คุณสมบัติหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ใช้ทดสอบ

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 Ω/phase	Type ONAN	Class A	
Θ _{OT} = 31 °C	g _{rMAX} = 13.5	τ = 3 hours	H = 1.1

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหา $R_{eq(ac)}$ ของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ใช้ทดสอบ[5],[7]

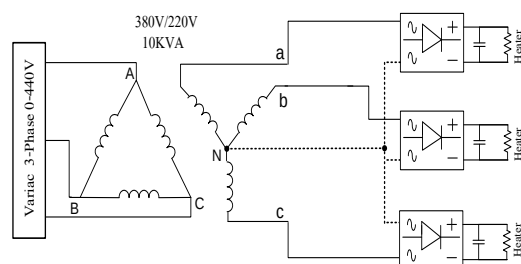
ลำดับฮาร์โมนิก (h)	$R_{eq(ac)}$ Ω /phase
1 (50 Hz)	1.526
3 (150 Hz)	1.537
5 (250 Hz)	1.553
7 (350 Hz)	1.574
9 (450 Hz)	1.617
11 (550 Hz)	1.726
13 (650 Hz)	1.825
15 (750 Hz)	1.969
17 (850 Hz)	2.182
19 (950 Hz)	2.380

3.2 การทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 1 เฟส

ในหัวข้อข้อย่อยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมในเรื่องของปริมาณกระแสฮาร์โมนิก และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ณ บริเวณส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง ได้มีการติดตั้งตัวเทอร์โมคัปเปิลตามตำแหน่งต่างๆในหม้อแปลง ได้แก่ ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิทั้ง 3 เฟส รวมถึงบริเวณน้ำมันด้านบน ดังรูปที่ 1 การต่อวงจรหม้อแปลงกับภาระไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 2



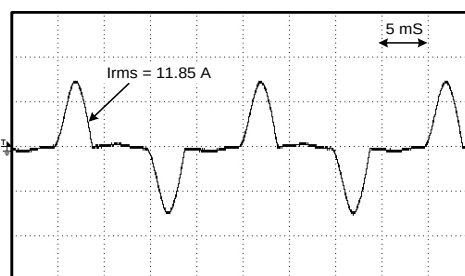
รูปที่ 1 การติดตั้งหัววัดเทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ภายในหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน



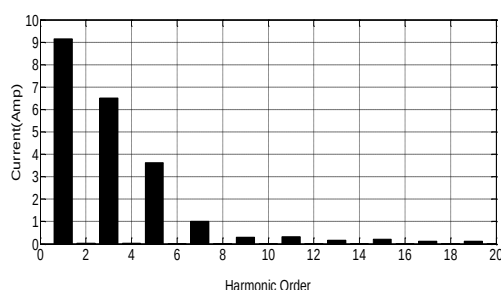
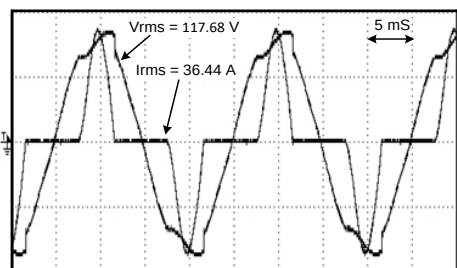
รูปที่ 2 วงจรการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง โดยใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 1 เฟส จำนวน 3 ชุด

ค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางขดลวดทุติยภูมิที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 3 สเปกตรัมกระแสฮาร์โมนิกทางขดทุติยภูมิดังรูปที่ 4 เห็นได้ว่านอกจากกระแสไฟฟ้าคลื่นมูลฐานแล้วยังมีฮาร์โมนิกลำดับ $2k \pm 1$ ได้แก่ 3, 5, 7

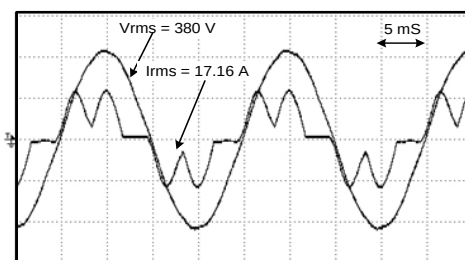
เกิดขึ้นอย่างปริมาณมาก ซึ่งกระแสเหล่านี้จะเหนี่ยวนำข้ามไปยังฝั่งขดลวดปฐมภูมิ และไหลวนในขดลวดที่ต่อแบบเดลต้าดังรูปที่ 5 และเมื่อวัดสัญญาณฮาร์มอนิกแสดงดังรูปที่ 6 โดยสังเกตเห็นได้ว่ามีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกเลขคี่ลำดับที่ 3, 5, 7 เกิดขึ้นมีปริมาณสูง ในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวด จะนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนอยู่ในรูปเดลต้าเหล่านี้ไปคูณกับค่าความต้านทาน $R_{eq(ac)}$ ของตารางที่ 3 จากนั้นนำค่ากำลังสูญเสียของแต่ละค่ามารวมกัน ส่วนรูปที่ 7 เป็นการวัดสัญญาณแรงดันสายถึงสายและกระแสสายที่ขั้วต่อสายของฝั่งปฐมภูมิ ส่วนรูปที่ 8 เป็นการวัดฮาร์มอนิกที่อยู่ฝั่งปฐมภูมิ ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่า ส่วนมากมีปริมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และที่ 7 เท่านั้น แต่จะมีฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 จำนวนน้อย สาเหตุเป็นเพราะฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไหลวนในรูปเดลต้าด้านปฐมภูมิ ไม่ไหลย้อนออกไปยังกริดภายนอก



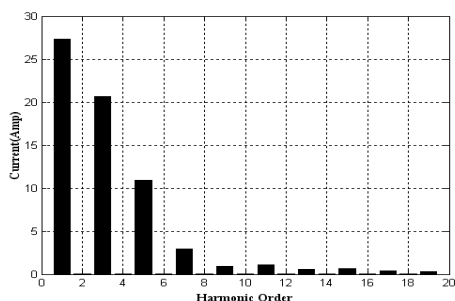
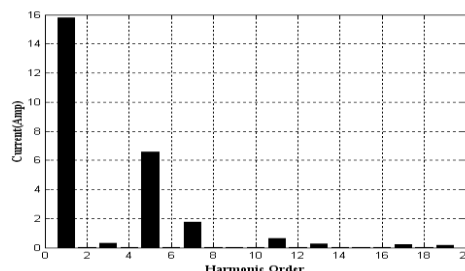
รูปที่ 5 กระแสเฟสที่ไหลวนอยู่ในรูปเดลต้าขดลวดปฐมภูมิ

รูปที่ 6 สเปกตรัมกระแสเฟสในรูปเดลต้าขดลวดปฐมภูมิ และค่า%ความผิดเพี้ยนกระแส (%THD_i) = 86%

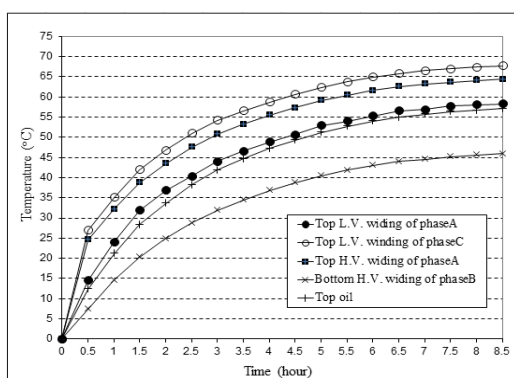
รูปที่ 3 สัญญาณกระแสและแรงดันขดลวดทุติยภูมิ



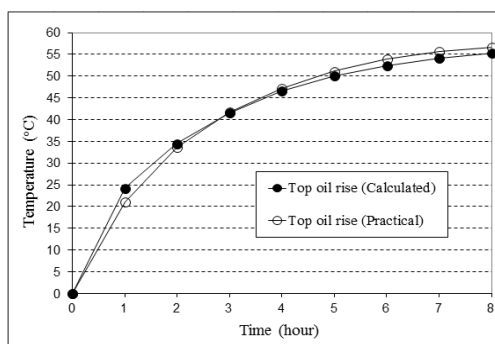
รูปที่ 7 สัญญาณกระแสไลน์และแรงดันทางขดลวดปฐมภูมิ

รูปที่ 4 สเปกตรัมกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิ และค่าความผิดเพี้ยนกระแส (%THD_i) = 86%รูปที่ 8 สเปกตรัมกระแสไลน์ขดลวดปฐมภูมิ และค่า%ความผิดเพี้ยนกระแส (%THD_i) = 44%

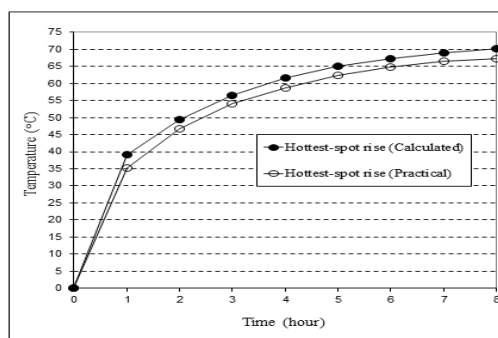
เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเมื่อมีการวางแผนการจ่ายภาระของหม้อแปลงแล้ว ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ทำนายจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง จึงได้มีการทดสอบหม้อแปลง เมื่อใช้ภาระแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีฮาร์มอนิกลำดับ $2k \pm 1$ โดยกำหนดให้ $I_{h1} = 9.15$ A (ประมาณ 100% ของพิกัดหม้อแปลง) ใช้ระยะเวลา 8.5 ชั่วโมง จากผลการทดสอบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของหม้อแปลงดังรูปที่ 9 เห็นได้ว่าที่บริเวณขดลวดด้านบนของหม้อแปลงเป็นจุดที่มีค่าอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งจุดดังกล่าวเป็นจุดที่ทำให้เกิดความเสื่อมสภาพของฉนวนมากที่สุด จากนั้นได้นำค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 เรียงตามลำดับ เห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ทั้งค่าจากการคำนวณ(รูปที่ 10 ด้วยสมการที่(7) รูปที่ 11 ด้วยสมการที่(11))และทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน รวมถึงยังมีค่าสูงกว่ากรณีที่เป็นภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส ที่มีกลุ่มฮาร์มอนิกประเภท $6K \pm 1$ ของงานวิจัย[5] อีกด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5, 7 มีค่าสูงกว่าประเภท $6K \pm 1$ จึงทำให้ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดมีค่ามากตามไปด้วย



รูปที่ 9 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม(คืออุณหภูมิหม้อแปลงที่วัดได้ลบด้วยอุณหภูมิแวดล้อม)ที่จุดต่างๆ ของหม้อแปลงทดสอบ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนจากการทดสอบและการทำนาย



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของขดลวดจากการทดสอบและการทำนาย

3.3 การวางแผนการจ่ายโหลดไฟฟ้าหม้อแปลง

3.3.1 การทำนายอุณหภูมิแวดล้อมของเขตพื้นที่ที่ติดตั้งหม้อแปลง

ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าคือภาระไฟฟ้า และอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญไม่ยิ่งหย่อนกว่ากันก็คืออุณหภูมิแวดล้อม ดังนั้นจำเป็นต้องพยากรณ์อุณหภูมิแวดล้อมล่วงหน้าตลอดหนึ่งปี เพื่อนำเอาข้อมูลนี้ไปวางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงในเขตพื้นที่นั้นๆ ตลอดระยะเวลาหนึ่งปีล่วงหน้าเช่นกัน งานวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมของเขตพื้นที่ จ.กาญจนบุรี[19] ซึ่งเก็บข้อมูลโดยกรมอุตุนิยมวิทยา สถานี 450201 ในปีพ.ศ.2562-2566 นำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละเดือนได้ค่าดังตารางที่ 4 จากนั้นนำค่าเหล่านี้ป้อนเข้าโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น

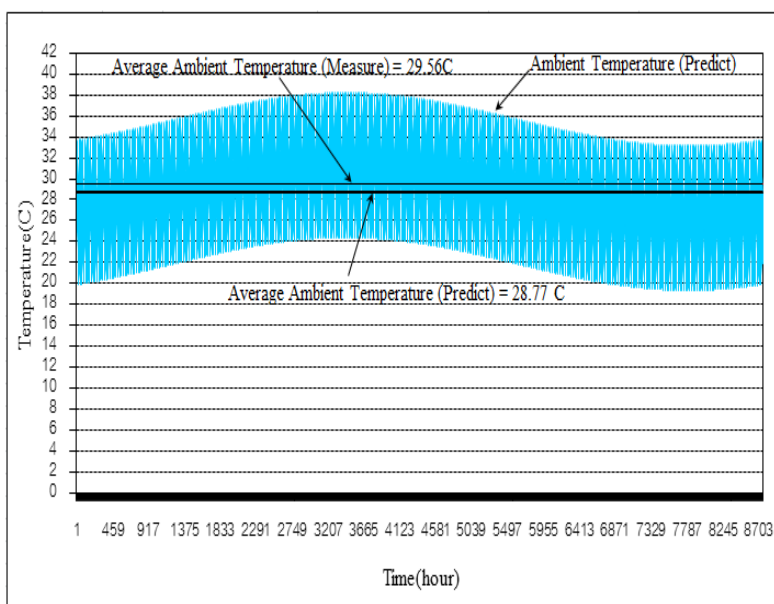
เพื่อคำนวณหาค่า θ_{ay} , A, B, Dx และ Tx สุดท้ายได้ มีนาคมถึงพฤษภาคมของปี พ.ศ.2567 ค่าที่ได้จากการนำไปใช้ในการทำนายค่าอุณหภูมิแวดล้อมในช่วงเดือน ทำนายกับค่าจริงแสดงดังรูปที่12 ถึงรูปที่ 14

ตารางที่4 ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมเบื้องต้นที่ได้จากการเก็บข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา จ.กาญจนบุรี สถานี450201

	พ.ศ.2562-2566											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
Average Mean maximum (θ_{adm} Average)	33.32	34.96	37.2	37.9	36.84	35.48	34.8	34.2	33.62	32.48	32.5	32.06
Average Mean minimum (θ_{adn} Average)	20.02	21.58	23.36	24.32	24.3	24.12	24.4	24.24	23.86	22.92	21.94	20.06

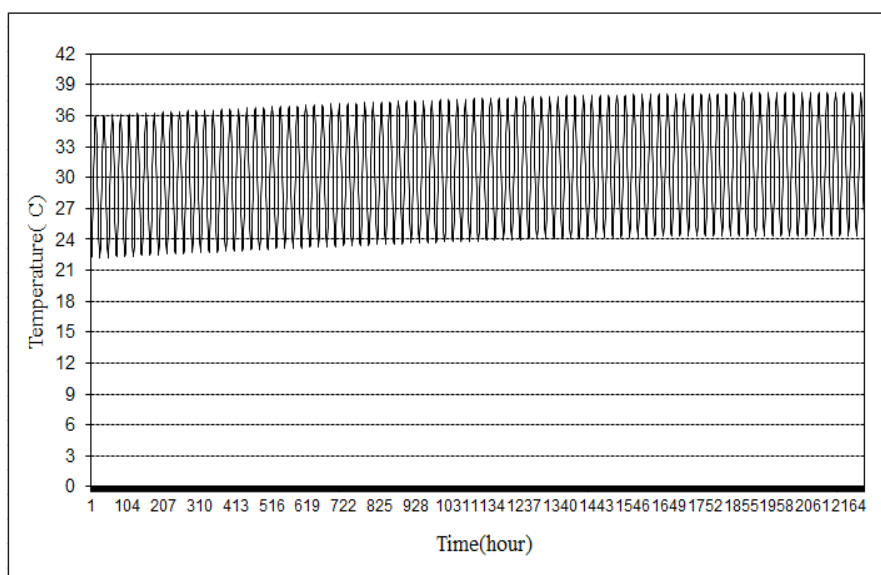
จากรูปที่12 เป็นผลการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้และค่าที่ทำนายของอุณหภูมิแวดล้อม โดยค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปีได้จากการวัดมีค่า 29.56°C มีค่าใกล้เคียงกับการทำนายที่ 28.77°C ส่วนรูปที่ 13 เป็นผลการทำนายช่วงเดือนที่มีอุณหภูมิสูงของปี เห็นได้ว่าช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคมมีค่าสูงสุดของปี ส่วนรูปที่14 เป็นการทำนายอุณหภูมิแวดล้อมตลอด 24 ชั่วโมง ค่าเฉลี่ย

อุณหภูมิที่วัดได้กับที่ทำนายมีค่าใกล้เคียงกันมาก (ค่าจากการวัด 31.80°C ค่าจากการทำนาย 31.30°C) ซึ่งทำให้มั่นใจได้ว่าการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของการทำนายอุณหภูมิแวดล้อมแบบซายน์สองชั้น สามารถนำไปทำนายอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงได้

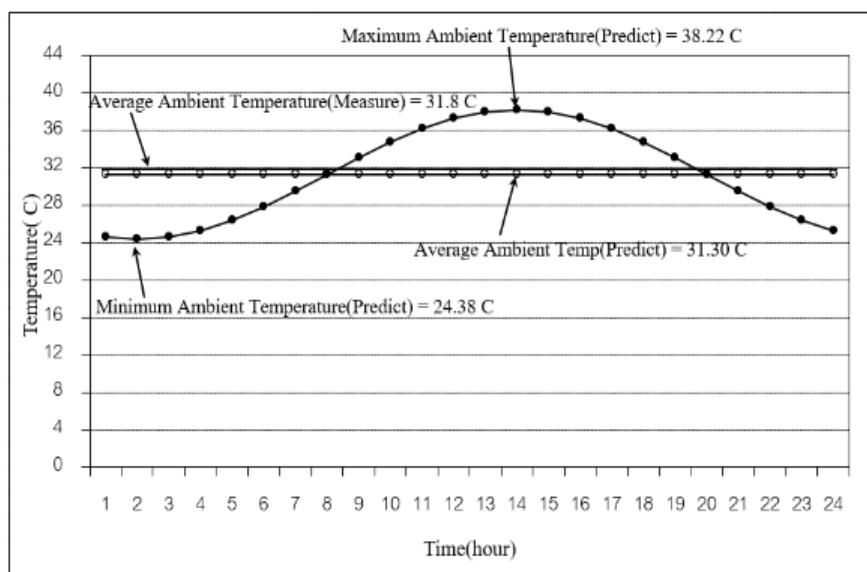


รูปที่ 12 อุณหภูมิแวดล้อมของแต่ละชั่วโมงตลอดปี พ.ศ. 2567

$$(\theta_{ay} = 28.77^{\circ}\text{C}, A = 2.525, B = 6.92, Dx = 144, Tx = 14.00)$$



รูปที่ 13 อุณหภูมิแวดล้อมเดือน มี.ค.- พ.ค. 2567 (เดือนที่ร้อนมากของปี)



รูปที่ 14 อุณหภูมิแวดล้อมของวันที่ 24 พ.ค. 2567

3.3.2 การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงในสภาวะภาระเกินพิกัด

ในทางปฏิบัติภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงจะไม่คงที่ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง โดยส่วนมากช่วงเวลากลางวันจะมากกว่าช่วงเวลากลางคืน ในกรณีศึกษานี้จะจำลองให้

ช่วงเวลา 08.00-18.00 น. เป็นช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าเคลื่อนมูลฐาน (I_{h1}) สูง 150% ของพิกัดดังรูปที่ 15 (ซึ่งมีค่าเท่ากับกับงานวิจัย[5] ที่ $I_{h1} = 150\%$, $I_{rms} = 162\%$) แต่ งานวิจัยนี้เป็นการะไม่เชิงเส้นแบบ 1 เฟส จำนวน 3

ชุด แต่งงานวิจัย[5] แตกต่างกันตรงที่เป็นแบบภาระไม่
เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส จำนวน 1 ชุด

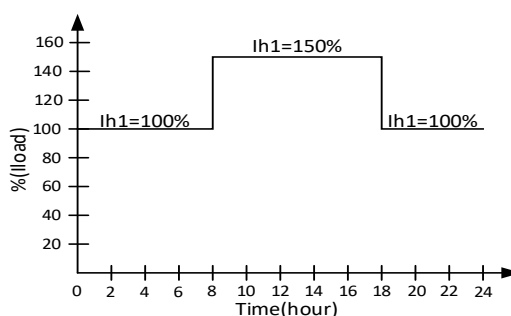
ช่วงเวลาที่ 1 และช่วงเวลาที่ 3

$I_{rms}(pri/phase)=11.85$ A ประกอบด้วย

$I_{h1}=9.15$ A(ประมาณ100%ของพิกัดหม้อแปลง)

$I_{h3}=6.5$ A, $I_{h5}=3.65$ A, $I_{h7}=1.0$ A, $I_{h9}=0.2$ A, $I_{h11}=0.22$ A,

$I_{h13}=0.1$ A, $I_{h15}=0.15$ A, $I_{h17}=0.1$ A, $I_{h19}=0.1$ A



รูปที่ 15 วัฏจักรโหลดของหม้อแปลงในแต่ละวัน

ช่วงเวลาที่ 2

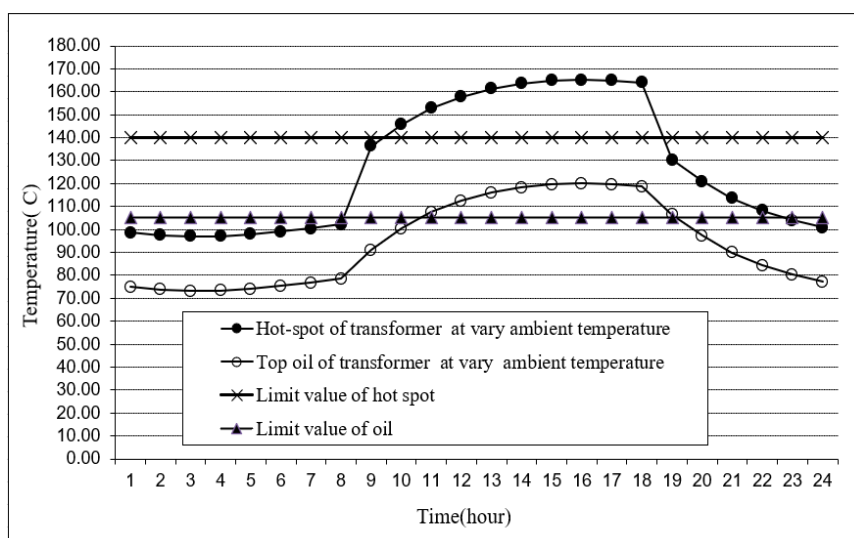
$I_{rms}(pri/phase)=17.78$ A ประกอบด้วย

$I_{h1}=13.725$ A(ประมาณ150%ของพิกัดหม้อแปลง)

$I_{h3}=9.75$ A, $I_{h5}=5.475$ A, $I_{h7}=1.5$ A, $I_{h9}=0.3$ A, $I_{h11}=0.33$

A, $I_{h13}=0.15$ A, $I_{h15}=0.225$ A, $I_{h17}=0.15$ A, $I_{h19}=0.15$ A

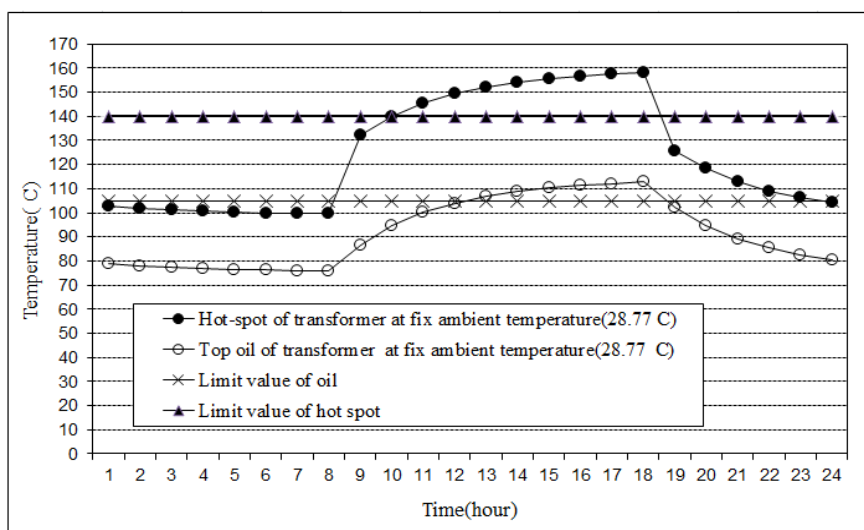
จากรูปที่ 16 เป็นค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดโดยใช้
อุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี มีค่าสูงสุดที่
 165.25°C และมีค่าเกินขีดจำกัด(140°C) ในช่วงเวลา
09.30-18.30 น. และอุณหภูมิน้ำมันด้านบนมีค่าอุณหภูมิ
สูงสุดที่ 119.93°C และมีค่าเกินขีดจำกัด(105°C) ในช่วง
เวลา 11.00-19.00 น.



รูปที่ 16 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดหม้อแปลง กรณีอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี

จากรูปที่ 17 เป็นค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดโดยใช้
อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยทั้งปี 28.77°C มีค่าสูงสุด
ที่ 158.00°C ซึ่งมีค่าเกินขีดจำกัด(140°C)[18]ในช่วง

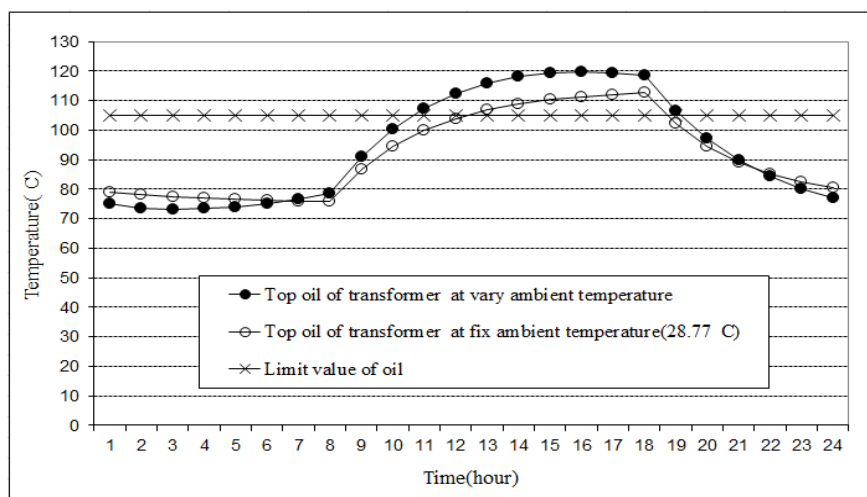
เวลา 10.00-18.30 น. และอุณหภูมิน้ำมันด้านบนมีค่า
อุณหภูมิสูงสุดที่ 112.70°C ซึ่งมีค่าเกินขีดจำกัด(105°C)
[18]ในช่วงเวลา 12.00-18.45 น.



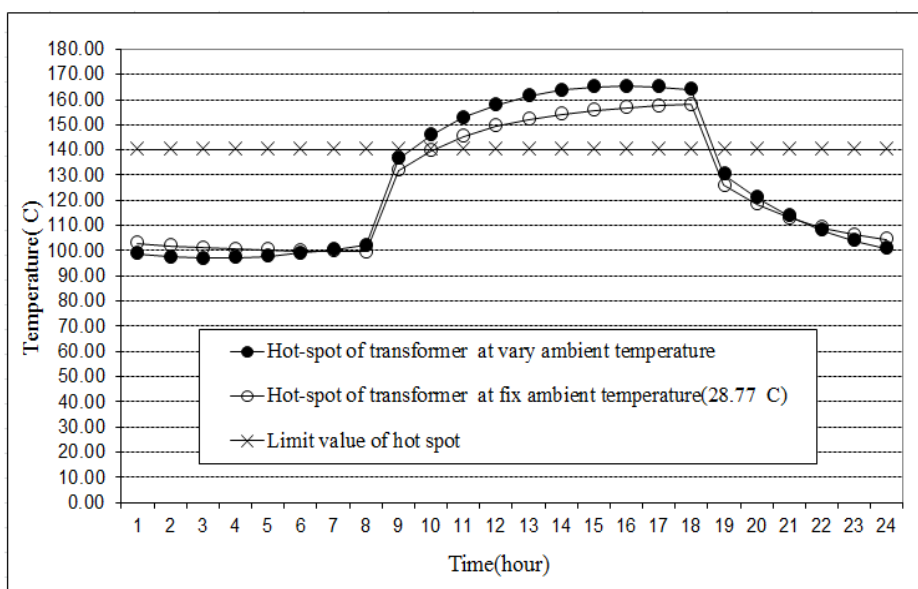
รูปที่ 17 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดห้อยแปลง กรณีอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปี (28.77 °C)

จากรูปที่ 18 ถึงรูปที่ 19 เป็นการจำลองเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดโดยใช้อุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีเทียบกับกรณีที่ใช้อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปี จากการจำลองของวันที่ 24 พ.ค.2567 ซึ่งเป็นวันที่อุณหภูมิร้อนที่สุดของปี (ได้จากโมเดลคณิตศาสตร์) เห็นได้ว่าทั้งค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดมีค่าเกินพิกัดอย่างมาก ทั้งกรณีที่ใช้โมเดลอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี

และโมเดลอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปี แต่การใช้อุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีที่ช่วงเวลา 11.00-18.00 น. จะมีค่ามากกว่าการใช้อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปีพอสมควร ซึ่งทำให้ทราบว่าการวางแผนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าควรที่จะนำโมเดลแบบอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีไปใช้งานมากกว่า



รูปที่ 18 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี



รูปที่ 19 เปรียบเทียบจุดร้อนสุดหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี

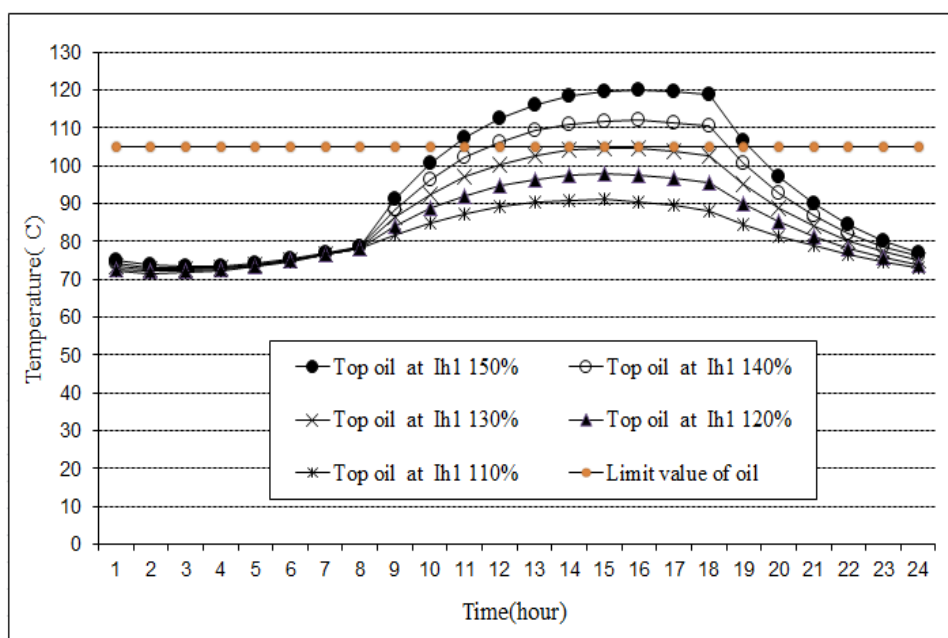
จากรูปที่ 20 ถึงรูปที่ 21 จำลองการจ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่า I_{h1} มีค่า 110% ถึง 150% เห็นได้ว่าที่ค่า I_{h1} เท่ากับ 140% และ 150% ค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดมีค่าสูงกว่าปกติอย่างมากตามลำดับ และค่าของอายุหม้อแปลงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิจุดร้อนจุดเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 5 ที่ I_{h1} มีค่า 150% อายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเหลือแค่ 0.72 ปีเท่านั้น ซึ่งต่างจากงานวิจัย[5] ที่เป็นภาระไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส มีค่า 9.6 ปี และรูปที่ 22 เป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์อายุของหม้อแปลงที่ได้จากการจำลองโดยใช้ ทฤษฎีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด(Least Square Regression) ช่วงที่ I_{h1} มีค่า 110% ถึง 150% (ค่า I_{h1} มีค่ามากกว่าปกติหม้อแปลง) ทำให้ขนาดของฮาร์มอนิกลำดับ $2K \pm 1$ เพิ่มขึ้นตามส่งผลให้ความค่าความเสื่อมสภาพของฉนวนมากขึ้น สุดท้ายทำให้อายุของหม้อแปลงลดลง ดังสมการที่(13)

ข้อจำกัดในการประเมินของโมเดลทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวคือ จะใช้เฉพาะหม้อแปลงที่มีพารามิเตอร์ตามงานวิจัยนี้ และใช้ในเขตพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี

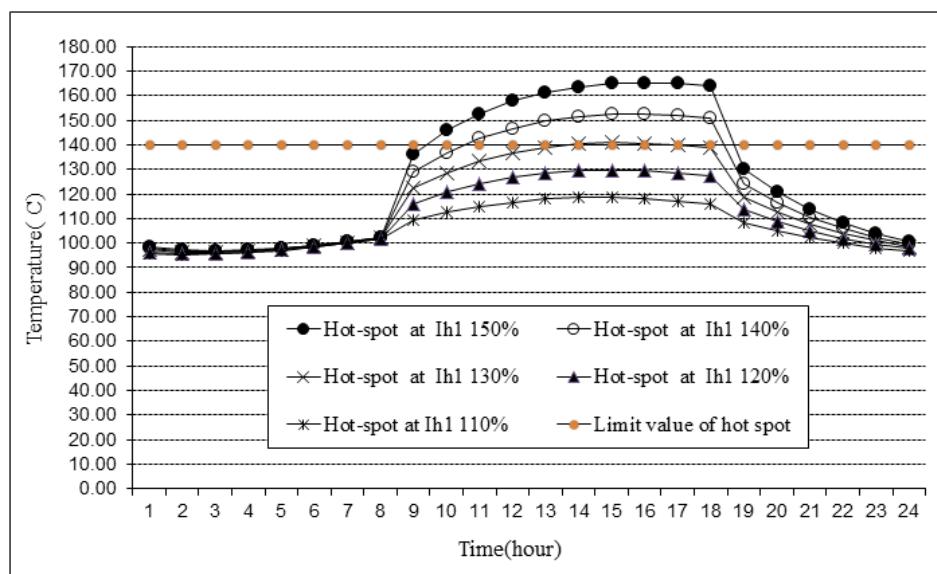
$$\text{Life time (year)} = -0.075(\%I_{h1})^3 + 2.06(\%I_{h1})^2 - 14.855(\%I_{h1}) + 32.918 \quad (13)$$

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่ค่า $\%I_{h1}$ 110% ถึง 150% อยู่ในช่วงเวลา 08.00 น. ถึง 18.00 น.

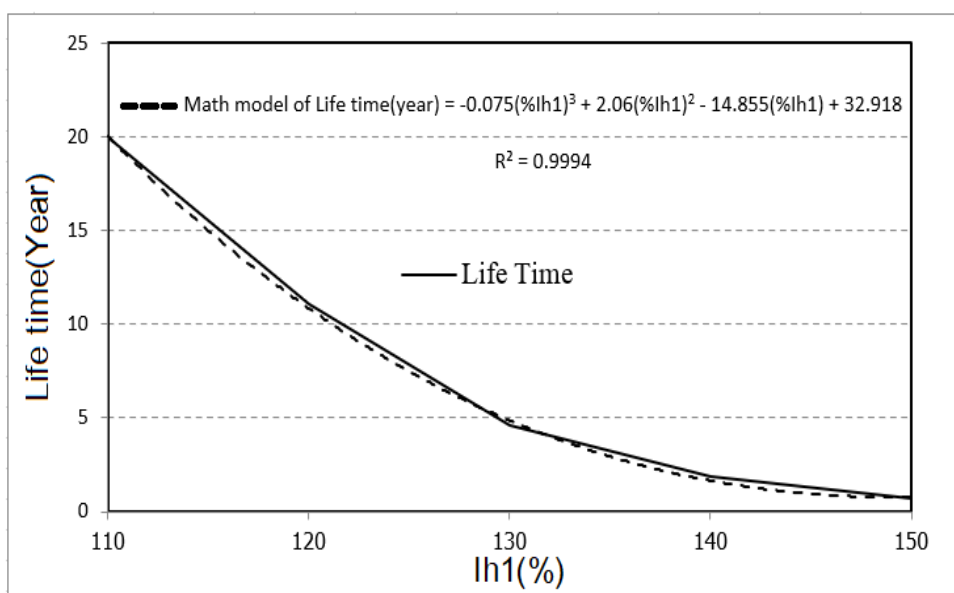
	I _{h1} (กระแสมาตรฐาน)				
	110%	120%	130%	140%	150%
อายุใช้งาน (Life time), ปี	20	11.04	4.58	1.85	0.72



รูปที่ 20 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี



รูปที่ 21 เปรียบเทียบจุดร้อนสูงสุดหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของหม้อแปลงกับค่า %Ih1

4. สรุปผลการวิจัย

ผลกระทบของฮาร์มอนิกจะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง ที่ฮาร์มอนิกลำดับ $2k \pm 1$ จะมีปริมาณฮาร์มอนิกและ %THD_i มากกว่าฮาร์มอนิกลำดับ $6k \pm 1$ [5] ส่งผลทำให้ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าสูงขึ้น และอีกปัจจัยหนึ่งคือค่าอุณหภูมิแวดล้อม ยิ่งช่วงกลางวันในฤดูร้อนค่าอุณหภูมิจะมีค่าสูง กรณีที่ช่วงเวลาดังกล่าวมีการใช้ภาระของหม้อแปลงเกินพิกัดจะทำให้ค่าจุดร้อนสุดของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลเสียกับอายุการใช้งานหม้อแปลงที่สั้นลง แนวทางการแก้ไขคือปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้พลังงานให้มาใช้ในช่วงเวลากลางคืน (กรณีที่สามารถทำได้) หรือมีการระบายความร้อนให้กับหม้อแปลง(หม้อแปลงแบบติดตั้งในอาคาร) ส่วนโมเดลทางคณิตศาสตร์ของอายุการใช้งานหม้อแปลงเทียบกับค่า %Ih1 (ดังสมการที่(13) หรือตารางที่ 5) จะช่วยในการวางแผนการจ่ายพลังงานของหม้อแปลง เห็นได้ว่าที่ %Ih1 = 110% อายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าจะยังคงอยู่ที่ 20 ปี

แต่ถ้าเพิ่ม %Ih1 = 150% อายุการใช้งานจะลดลงอย่างมากเหลือแค่ 0.72 ปี ส่วนซอฟต์แวร์การจำลองการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงที่พัฒนาขึ้นนี้ จะช่วยในการทำนายค่าอุณหภูมิหม้อแปลงและอุณหภูมิแวดล้อมรวมถึงอายุของหม้อแปลงที่เป็นแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้ ส่วนปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบกับอายุการใช้งานหม้อแปลงซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ละทิ้งไป ได้แก่ แรงทางกลที่เกิดขึ้นการหม้อแปลง[21] และคุณสมบัติทางเคมีที่เกิดขึ้นกับฉนวน[22] ซึ่งทั้งสองสิ่งนี้เป็นเรื่องที่น่าสนใจต่อไปในอนาคตได้เป็นอย่างดี

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. M. Islam, D. Sutanto, and K. Muttaqi, "Protecting PFC capacitors from overvoltage caused by harmonics and system resonance using high temperature superconducting reactors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 2, pp. 1–5, Mar. 2019.

- [2] S. A. Saleh, E. W. Zundel, J. Cardenas, E. F. S. Hill, J. Meng, and G. Y. Morris, "Effects of loading levels on harmonic distortion in power transformers due to GIC flows," in 2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 29 Oct.–2 Nov. 2023, pp. 1–6.
- [3] R. Tamang, B. Shrestha, A. Kashichhwa, R. Gautam, et al., "Analysis of the effect of current harmonic induced heating on transformer ageing," in 4th International Conference on Role of Energy on Sustainable Social Development (RESSD), 2025, pp. 1–6.
- [4] S. Im, S. Park, J. Kim, J. Chin, K. Cha, and M. Lim, "Temperature prediction of ultra-high-speed SPMSM for FCEV air compressor considering PWM current harmonics," in 2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 25–28 Oct. 2021, pp. 1–6.
- [5] S. Tadsuan, "Testing and Planning of Load of Oil-Immersed Transformer under Non-linear Load Condition in Bangkok and Surrounding Area," KMUTT Research and Development Journal, vol. 31, no. 2, pp. 335–355, Apr.–Jun. 2008. (in Thai)
- [6] P. Sukserm and S. Tadsuan, "Comparison of testing results of oil-immersed transformer under linear load and non-linear load conditions," SAU Journal of Science & Technology, vol. 4, no. 1, Jan.–Jun. 2018, pp. 1–10. (in Thai)
- [7] S. Tadsuan and P. Sukserm, "Testing and prediction of the temperature of oil-immersed transformer under non-linear load condition with 1 phase rectifier," EAU Heritage Journal of Science and Technology, vol. 12, no. 3, Sep.–Dec. 2018, pp. 1–10. (in Thai)
- [8] T. Chegsakul and T. Tayjasant, "An impact of harmonic currents, load levels and ambient temperatures on transformer loss of life," in 2019 2nd International Conference on Clean Energy and Electrical Systems, 27–29 Jun. 2019, Nanjing, China, pp. 1–6.
- [9] A. Elmoudi, M. Lehtonen, and H. Nordman, "Effect of harmonics on transformers loss of life," in Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, ON, Canada, 2006, pp. 1–6.
- [10] ANSI/IEEE C57.91, 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, 1981.
- [11] ANSI/IEEE C57.92, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Pad-Mounted Power Transformers, up to and including 100 MVA with 65°C or 55°C Average Winding Rise, 1981.
- [12] ANSI/IEEE C57.115, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Pad-Mounted Power Transformers Rated in Excess of 100 MVA 65°C Winding Rise, 1981.
- [13] W. P. Linden, "An investigation of the thermal performance of an oil-filled transformer winding," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 3, pp. 1347–1357, Jul. 1992.
- [14] IEEE Std C57.110, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-sinusoidal Load Currents, 1998.

- [15] S. Kulshreshtha and D. K. Chaturvedi, “Effect of generated harmonics on transformer losses due to solar penetration,” International Research Journal on Advanced Engineering and Management, vol. 2, no. 6, pp. 1939–1945, Jun. 2024.
- [16] M. H. Mohd Wazir, D. Mat Said, N. M. Sapari, M. S. M. Yunus, and Z. I. M. Yassin, “An electro-thermal modeling of distribution transformer for hottest spot evaluation under photovoltaic-induced harmonics,” International Journal of Renewable Energy Development, vol. 14, no. 3, pp. 450–462, May 2025.
- [17] N. Miteva, L. Sima, and K. J. Dagan, “Power loss calculation in oil-type distribution transformers supplying nonlinear loads,” Electronics, vol. 14, 2500, pp. 1–16, 2025.
- [18] IEC 354, Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer, 1991.
- [19] Thai Meteorological Department, Agroclimatological Data, Kanchanaburi Province, Station 450201, 2019–2024. [Online]. Available: <https://www.tmd.go.th/>. [Accessed: June. 1, 2025].
- [20] Z. Yuan, H. Wu, X. Jiang, and J. Zhao, “Investigating aging characteristics of oil-immersed power transformers’ insulation in electrical–thermal–mechanical combined conditions,” Energies, vol. 16, no. 19, p. 6865, 2023. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10647747/> [Accessed: Oct. 31, 2025].
- [21] G. Kumar, S. Nandini, A. Chandrasekaran, and A. S. Rao, “Comprehensive assessment of transformer oil after thermal aging,” Energies, vol. 18, no. 8, p. 1915, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/8/1915> [Accessed: Oct. 31, 2025].

ประวัติผู้ประพันธ์

สิริวิษ ทัศวน



สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (วศ.ม. ไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรง

ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

งานวิจัยที่สนใจ : คุณภาพไฟฟ้ากำลัง ความร้อนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า และการควบคุม ติดตามและป้องกันเครื่องจักรไฟฟ้าด้วยระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และระบบฟาร์มอัจฉริยะ

ชนภัช เชนนารัตน์



สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (วศ.ม. ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

งานวิจัยที่สนใจ : เครื่องจักรกลไฟฟ้า คุณภาพไฟฟ้ากำลัง ระบบควบคุมอัตโนมัติในภาคอุตสาหกรรม