

การทดสอบและวางแผนการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า แบบแช่น้ำมัน เมื่อสภาวะโหลดแบบไม่เชิงเส้น ในเขตกรุงเทพฯ และพื้นที่ใกล้เคียง

สิริวิษ ทัตสวน

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ หนองแขม กรุงเทพฯ 10160

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอเรื่องการทดสอบและวางแผนการใช้งานของหม้อแปลงจำหน่ายแบบแช่น้ำมันในสภาวะที่หม้อแปลงมีโหลดแบบไม่เชิงเส้นและเกินพิกัดในพื้นที่กรุงเทพฯ และพื้นที่ใกล้เคียง เพื่อยืดอายุใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน โดยการจำลองสภาพวัฏจักรโหลดไฟฟ้าของหม้อแปลงและคำนวณค่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบน อุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำ อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำ อายุสูญเสียและอายุใช้งานของหม้อแปลง โดยได้มีการเปรียบเทียบผลการจำลองในเงื่อนไขต่างๆ 4 แบบด้วยกัน คือ 1. เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปี 2. เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี 3. เมื่อควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมที่ 25 °C 4. เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีและมีการปรับวัฏจักรโหลดใหม่ ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ทราบถึงแนวทางการป้องกันความเสียหาย อันเนื่องมาจากความร้อนของหม้อแปลงเกินพิกัดได้เป็นอย่างดีและสามารถนำหลักการเดียวกันนี้ประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงในเขตพื้นที่อื่นๆ ที่มีอุณหภูมิแวดล้อมแตกต่างกันไปหรือใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาด (kVA) ใหญ่ได้อีกด้วย

Testing and Planning of Load of Oil-Immersed Transformer when Non-linear Load Condition in Bangkok and Surrounding Area

Siriwich Tadsuan

South East Asia University, Nhongkham, Bangkok 10160

Abstract

This paper presents the testing and planning of using oil-Immersed transformer under non-linear load and over load condition in Bangkok and surrounding area. The purpose of this research is to extend the lifetime of oil-Immersed transformer. The simulation of load cycles and calculation of top oil temperature, hot-spot temperature, top oil temperature rise, hot-spot rise temperature, loss of life and lifetime of transformer were presented. There were 4 conditions of temperature of the transformer from simulations : 1) yearly average constant ambient temperature ; 2) yearly varying ambient temperatures ; 3) control of ambient temperature at 25 °C and 4) varying ambient temperatures in a year and load cycle adjustment. The result showed the damage protection of a transformer due to overrated heat and application to transformer's other areas at different ambient temperatures or with large (kVA) transformers.

1. บทนำ

ความร้อนที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าจะเป็นตัวกำหนดสมรรถนะการใช้งานของตัวหม้อแปลง ถ้าหม้อแปลงมีอุณหภูมิต่ำจะทำให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดได้มากกว่าปกติ ในทางกลับกันถ้าหม้อแปลงมีอุณหภูมิที่สูงจะทำให้ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดต่ำกว่าปกติ ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดขนาดการจ่ายกระแสของหม้อแปลงก็คืออุณหภูมิ จาก [1] ได้ทดสอบหาอุณหภูมิของตัวหม้อแปลงที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีใช้แหล่งจ่ายสัญญาณชายนี เช่น จุดร้อนสุดของลวดตัวนำ อุณหภูมิเพิ่มเติมเฉลี่ยของลวดตัวนำ อุณหภูมิของน้ำมันด้านบน อุณหภูมิเพิ่มเติมแตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดและค่าเวลาความร้อนของน้ำมันคงตัว เมื่อหม้อแปลงมีอุณหภูมิตั้งกล่าวสูงกว่าขีดจำกัด สิ่งก็ตามมากก็คือจะทำให้อายุใช้งานของหม้อแปลงลดลง ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอายุใช้งานของหม้อแปลงสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2. ทฤษฎี

2.1 อายุของฉนวนโดยพิจารณาจากความร้อน

อายุของฉนวนหรือความเสื่อมสภาพของฉนวนขึ้นกับฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา ในการพิจารณาที่ฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆ ของฉนวนจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ที่บริเวณจุดร้อนสุดจะได้รับความเสื่อมสภาพมากกว่าบริเวณอื่นๆ เพราะฉะนั้นในการศึกษาอายุของฉนวนมักเป็นการพิจารณาผลกระทบของอายุที่เกิดขึ้นจากการพิจารณาอุณหภูมิที่จุดร้อนสุด

จาก [2] ในการแนะนำสมมติฐานของค่าความเสื่อมสภาพของฉนวนตามทฤษฎีสมการของ Arrhenius ได้กล่าวไว้ว่าที่อายุของฉนวนจะมีฟังก์ชันเหมือนกับลอการิทึม ดังสมการที่ 1

$$\text{Log}_{10} \text{life (hour of life)} = A + \frac{B}{T} \quad (1)$$

A, B คือค่าคงที่ โดยมีค่าต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน [2-4]

ขนาดหม้อแปลง	อุณหภูมิเพิ่มเติมเฉลี่ยของขดลวด, °C	A	B
หม้อแปลงขนาด 500 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

ดังนั้น จะได้อายุใช้งาน หน่วยชั่วโมง คือ

$$\text{hour of life} = 10^{\left(A + \frac{B}{T}\right)} \quad (2)$$

ส่วนกลับของอายุใช้งานคืออายุสูญเสียแสดงดัง

สมการที่ 3

$$\text{Loss of life} = 10^{-\left(A + \frac{B}{T}\right)} \quad (3)$$

เมื่อ

$$T = \Theta_h + 273 \tag{4}$$

Θ_h คือ อุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของตัวนำ, °C

จากสมการที่ 5 จะใช้ได้เฉพาะที่ค่า $T(\Theta_h + 273)$ ของเวลา t เพียงค่าเดียว แต่ในสภาพความเป็นจริงระดับของค่า T จะมีหลายค่าในช่วงเวลาทั้งหมดที่พิจารณา ดังนั้นสามารถหาค่าอายุขัยเฉลี่ยรวมดังสมการที่ 6

$$\text{Total Loss of life} = \sum_{t=1}^{t=n} 10^{-\left(A + \frac{B}{T_t}\right)} \tag{6}$$

2.2 อุณหภูมิหม้อแปลงเมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น และอุณหภูมิแวดล้อม

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันนี้เป็นแบบกินกระแสเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น อุปกรณ์ที่กินกระแสไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะเป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิก ซึ่งจะทำให้

ที่สภาวะคงตัว

$$\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[\frac{P_T}{P_{TR}} \right]^{0.8} \tag{8}$$

จาก [6], [7] ค่า P_{core} เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้ากรณีที %THDV ของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำมี

$$P_T = P_{LL(total)} + P_{coreR} + P_{tankR} \tag{10}$$

จากสมการที่ 3 เมื่อพิจารณาในช่วงระยะเวลา t จะได้ดังสมการที่ 5

$$\text{Loss of life} = t \square 10^{-\left(A + \frac{B}{T}\right)} \tag{5}$$

และสามารถคำนวณหาอายุใช้งานของหม้อแปลงได้จากส่วนกลับของอายุขัยเฉลี่ยรวมดังสมการที่ 7

$$\text{Life} = \frac{1}{\text{Total Loss of life}} = \frac{1}{\sum_{t=1}^{t=n} 10^{-\left(A + \frac{B}{T_t}\right)}} \tag{7}$$

ให้หม้อแปลงมีความร้อนเกินปกติ จะส่งผลให้อายุใช้งานสั้นลง จาก [5] ได้คำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันชนิด ONAN โดยการนำ K-Factor มาร่วมพิจารณาด้วย ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 8 ถึง 11

$$P_{TR} = P_{cuR} + P_{coreR} + P_{tankR} \tag{9}$$

ค่าน้อย ค่า P_{core} จะมีค่าใกล้เคียงกับ P_{coreR} และ P_{tank} มีค่าใกล้เคียงกับ P_{tankR} ดังนั้นจะได้

$$P_{LL(total)} = \sum_{h=1}^{h=\max} (I_h)^2 \cdot R_h \tag{11}$$

เมื่อ

P_T	คือ กำลังสูญเสียรวม, W
P_{TR}	คือ กำลังสูญเสียรวมที่พิกัด, W
$P_{LL (total)}$	คือ กำลังสูญเสียรวมขณะมีโหลด, W
P_{cuR}	คือ กำลังสูญเสียที่ขดลวดที่พิกัดหม้อแปลง, W
P_{coreR}	คือ กำลังสูญเสียแกนเหล็กที่พิกัดหม้อแปลง, W
$P_{tan kR}$	คือ กำลังสูญเสียที่ถังหม้อแปลงที่พิกัดหม้อแปลง, W
I_h	คือ กระแสไฟฟ้าประสิทธิผลของฮาร์โมนิกลำดับ h, A
R_h	คือ ความต้านทานที่ฮาร์โมนิกลำดับ h, Ω
Θ_{ou}	คือ อุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายน้ำมันด้านบนที่ทุกๆ โหลด, °C
Θ_{or}	คือ อุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด, °C

และจาก [2] ที่สภาวะชั่วคราว

$$\Theta_{ot} = \Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (12)$$

Θ_{oi}	คือ อุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นน้ำมันด้านบน, °C
Θ_{ot}	คือ อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆ ในสภาวะชั่วคราว, °C
τ	คือ ค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัว, ชั่วโมง
t	คือ ช่วงเวลาการต่อโหลดของหม้อแปลง, ชั่วโมง

จาก [5]

$$\Theta_{gu} = \left[\frac{1 + [(K - \text{factor}) \times 0.08]}{1 + 0.08} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (13)$$

และจาก [8]

$$\Theta_{gr} = H \cdot g_r \quad (14)$$

Θ_{gr}	คือ อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด, °C
Θ_{gu}	คือ อุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายของจุดร้อนสุดของตัวนำที่มากกว่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่ทุกๆ โหลด, °C
K-factor	คือ ตัวประกอบ เค
g_r	คือ อุณหภูมิเพิ่มแตกต่างระหว่างน้ำมันกับขดลวดที่พิกัดโหลด, °C
H	คือ ตัวประกอบอุณหภูมิจุดร้อนสุด จาก [8] เมื่อเป็นแบบ ONAN = 1.1

จากสมการที่ 13 เป็นการทดสอบที่ $(I_{rms})^2 \cdot R_{dc}$ ที่พิกัดโหลด แต่ในสภาพความเป็นจริงค่าระดับโหลดที่เกิดขึ้น

จริงอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้หลายๆ ค่า ดังนั้น สามารถปรับเป็นสมการที่ 15 ถึง 17

$$\Theta_{gu} = \left[\frac{\left(\frac{(I_{rms})^2 R_{dc}}{(I_{rms_R})^2 R_{dc}} \right) + [(K\text{-factor}) \square 0.08]}{1 + 0.08} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (15)$$

$$\Theta_{gu} = \left[\left(\frac{\left(\frac{[(I_{rms})^2 R_{dc}] + [(I_{rms_R})^2 R_{dc} \square (K\text{-factor}) \square 0.08]}{(I_{rms_R})^2 R_{dc}} \right)}{1 + 0.08} \right) \square \left(\frac{(I_{rms_R})^2 R_{dc}}{(I_{rms_R})^2 R_{dc}} \right) \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (16)$$

$$\Theta_{gu} = \left[\left(\frac{[(I_{rms})^2 R_{dc}] + [(I_{rms_R})^2 R_{dc} \square 0.08 \square (K\text{-factor})]}{[(I_{rms_R})^2 R_{dc}] + [0.08 \square (I_{rms_R})^2 R_{dc}]} \right) \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (17)$$

เมื่อ

I_{rms} คือ กระแสไฟฟ้าประสิทธิผล, A

I_{rms_R} คือ กระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่พิกัดหม้อแปลง, A

R_{dc} คือ ความต้านทานกระแสตรง, Ω

จาก [5] ได้พิจารณาค่าสูงสุดต่อหน่วยของค่าสูญเสียกระแสไหลวนมีค่า 2.0% ของ $(I_{rms})^2 \cdot R_{dc}$ และ [5] ได้สมมติค่าสูญเสียกระแสไหลวนที่จุดร้อนสุดมีค่าเป็น 4 เท่า

ของค่าเฉลี่ยของค่าสูญเสียกระแสไหลวน ซึ่งแสดงดังสมการที่ 18, 19 ทำให้สามารถปรับสมการที่ 17 เป็นสมการที่ 20 หรือสมการที่ 21

$$P_{ecw_R} = 0.02 \square (I_{rms_R})^2 R_{dc} \quad (18)$$

$$P_{ecw_H} = 4 \square P_{ecw_R} = 0.08 \square (I_{rms_R})^2 R_{dc} \quad (19)$$

$$\Theta_{gu} = \left[\left(\frac{[(I_{rms})^2 R_{dc}] + [4 \square P_{ecw_R} \square (K\text{-factor})]}{[(I_{rms_R})^2 R_{dc}] + [4 \square P_{ecw_R}]} \right) \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (20)$$

$$\Theta_{gu} = \left[\left(\frac{[(I_{rms})^2 R_{dc}] + [P_{ecw_H} \square (K\text{-factor})]}{[(I_{rms_R})^2 R_{dc}] + P_{ecw_H}} \right) \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (21)$$

จากสมการ K-Factor [5], [9] ทำให้สามารถปรับสมการที่ 21 เป็นสมการที่ 23

$$K\text{-Factor} = \frac{P_{ecw}}{P_{ecw_R}} = \sum_{h=1}^{\infty} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 \quad (22)$$

$$\Theta_{gu} = \left[\left(\frac{[(I_{rms})^2 R_{dc}] + \left[P_{ecw_H} \square \left(\frac{P_{ecw}}{P_{ecw_R}} \right) \right]}{[(I_{rms_R})^2 R_{dc}] + P_{ecw_H}} \right) \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (23)$$

เมื่อ

จากสมการที่ 24 ค่า P_{OSL} มีค่าน้อย ซึ่งสามารถ
ละเลยได้ ดังนั้น

$$P_{ecw} = P_{LL(\text{total})} - (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} - P_{OSL} \quad (24)$$

$$P_{ecw} = P_{LL(\text{total})} - (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} \quad (25)$$

P_{ecw} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขดลวด, W

P_{ecw_R} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขดลวดที่พิกัด, W

P_{ecw_H} คือ กำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่จุดร้อนสุด, W

P_{OSL} คือ กำลังสูญเสียปลั๊กย่อยอื่นๆ นอกเหนือจากขดลวด, W

เมื่อรวมสมการที่ 12 กับสมการที่ 23 จะได้อุณหภูมิ
เพิ่มของจุดร้อนสุดและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลง

$$\Theta_{hrise} = \Theta_{ot} + \Theta_{gu} \tag{26}$$

แบบแช่น้ำมันแสดงได้ตั้งสมการที่ 26 และ 27 เรียงตาม
ลำดับ

$$\Theta_h = \Theta_{hrise} + \theta_a \tag{27}$$

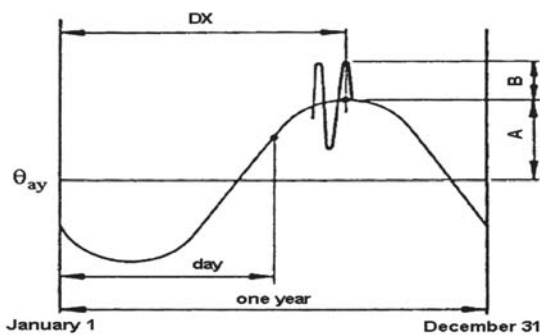
Θ_{hrise} คือ อุณหภูมิเพิ่มที่จุดร้อนสูงสุดของตัวนำ, °C

การต่อโหลดหม้อแปลงนั้นจำเป็นต้องพิจารณา
อุณหภูมิแวดล้อมร่วมด้วย จาก [8] ได้มีการหาค่าอุณหภูมิ

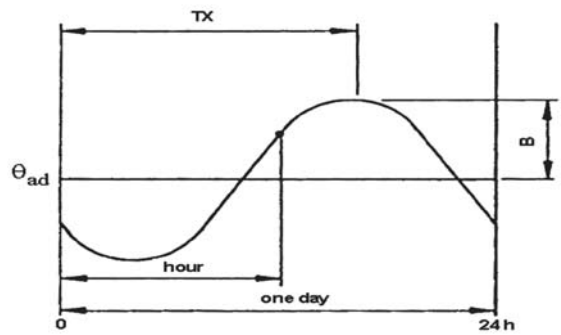
แวดล้อมแบบฟังก์ชันซายน์สองชั้น (Double sinusoidal)
ตั้งสมการที่ 28

$$\theta_a = \theta_{ay} + A \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} (\text{day} - D_x) \right] + B \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{24} (\text{hour} - T_x) \right] \tag{28}$$

- θ_{ay} = อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยต่อปี °C
- A = ขนาดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงประจำปีของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิประจำวัน °C
- B = ขนาดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงประจำวัน °C
- D_x = วันที่ร้อนที่สุดประจำปี
- T_x = ชั่วโมงที่ร้อนที่สุดประจำวัน (ประมาณเวลา 14.00 น.)
- day = วันที่ที่ต้องการแสดงผลอุณหภูมิ
- hour = ชั่วโมงที่ต้องการแสดงผลอุณหภูมิ



รูปที่ 1 นิยามของพารามิเตอร์สำหรับสมการคลื่นซายน์
2 ชั้นในช่วงเวลา 1 ปี

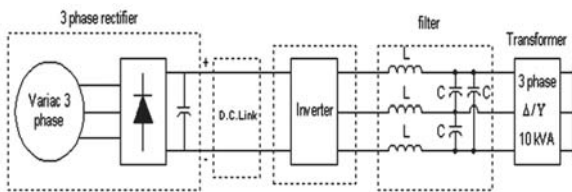


รูปที่ 2 นิยามของพารามิเตอร์สำหรับสมการคลื่นซายน์
2 ชั้นในช่วงเวลา 1 วัน

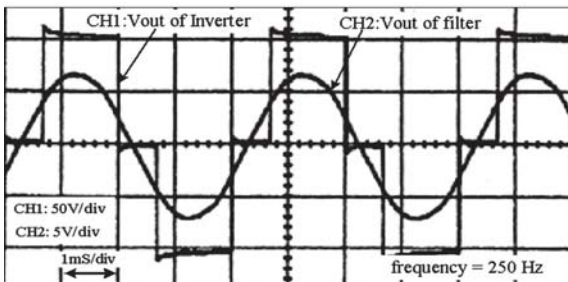
3. การทดสอบและการวางแผนการจ่ายโหลดไฟฟ้าหม้อแปลง

3.1 การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียขณะมีโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ

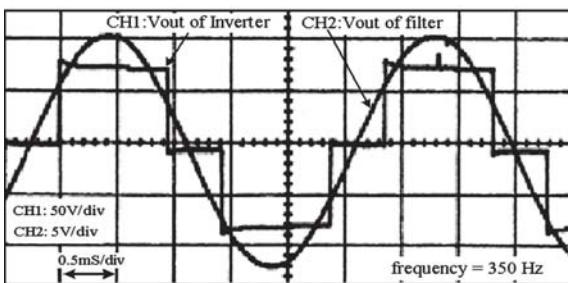
จุดประสงค์เพื่อต้องการหาค่าความต้านทานของวงจรสมมูลที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ ($R_{eq(ac)}$) เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ จากนั้นนำค่ากำลังสูญเสียดังกล่าวไปหาค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุด



รูปที่ 3 วงจรการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ



รูปที่ 4 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ที่ความถี่ 250 Hz

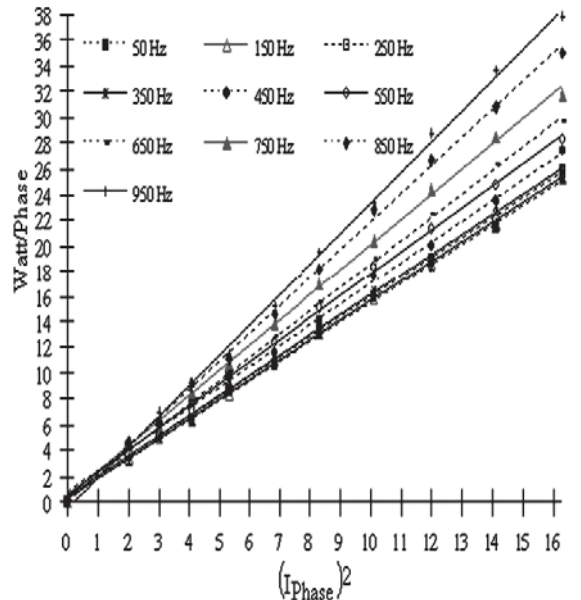


รูปที่ 5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฟิลเตอร์และขาออกฟิลเตอร์ที่ความถี่ 350 Hz

หม้อแปลง โดยการทดสอบใช้อินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบสร้างขึ้นเพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตรูปชายนันแสดงวงจรทดสอบดังรูปที่ 3 จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ [10] สัญญาณบางรูปแสดงดังรูปที่ 4, และ 5 โดยหม้อแปลงมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2 จากผลการทดสอบหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลดต่อ (I_{Phase}) ที่กระแสฮาร์โมนิกต่างๆ ดังรูปที่ 6 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติหม้อแปลงแบบแห้งน้ำมันที่ใช้ทดสอบ

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		
$R_{dc} = 1.457 \Omega/\text{phase}$	Type ONAN	Class A	
$\Theta_{Or} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$	$g_{fmax} = 13.5$	$\tau = 3 \text{ hours}$	H = 1.1



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของลวดตัวนำต่อค่า

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์จากการทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ

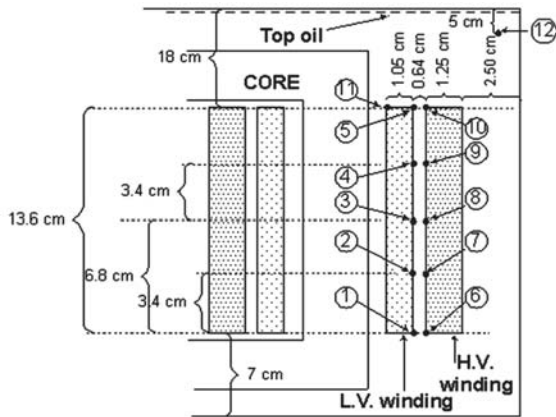
ลำดับ ฮาร์โมนิก (h)	สมการจากการทดสอบ ได้จากใช้ Least-squares method	$R_{eq} (ac)$ (Ω /phase)
1 (50 Hz)	$P = 1.526 (I^2) + 0.2160$	1.526
3 (150 Hz)	$P = 1.537 (I^2) + 0.0956$	1.537
5 (250 Hz)	$P = 1.553 (I^2) + 0.2802$	1.553
7 (350 Hz)	$P = 1.574 (I^2) + 0.2871$	1.574
9 (450 Hz)	$P = 1.617 (I^2) + 0.7310$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

3.2 การทดสอบและทำนายอุณหภูมิหม้อแปลง เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

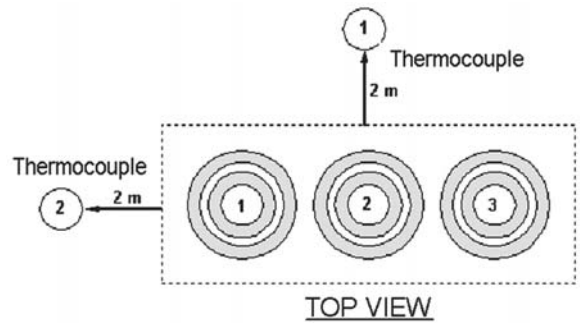
ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตามตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 7 แสดงภาพจริงดังรูปที่ 8 และวัดอุณหภูมิแวดล้อมดังรูปที่ 9 ขั้นตอนการทดสอบต่อวงจรดังรูปที่ 10 จ่ายแรงดันที่พิกัดหม้อแปลงและปรับโหลดมีสัญญาณแสดงดังรูปที่ 11 ซึ่งมีค่า $I_{rms}(pri)/phase = 9.88A$ (112.5%) ประกอบด้วย $I_{h1} = 8.78A$ (พิกัดหม้อแปลง100%), $I_{h5} = 4A$, $I_{h7} = 1.9A$, $I_{h11} = 0.5A$, $I_{h13} = 0.35A$ ค่า%THD_v (HV) = 2% และ%THD_i (HV) = 50.6% ข้อมูลดังกล่าววัดจาก

เพาเวอร์มิเตอร์ ยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX รุ่น True rms F25

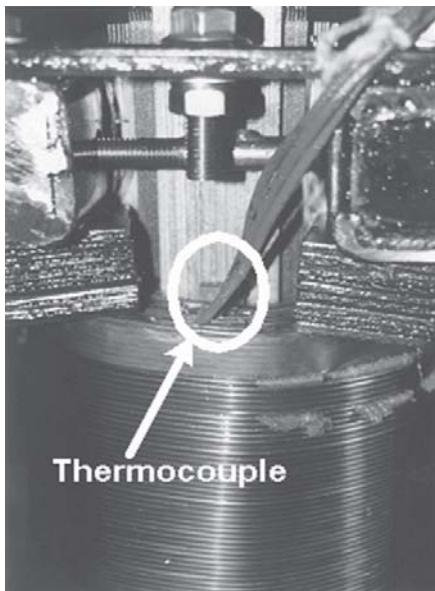
ผลการทดสอบรูปที่ 12-13 แสดงให้เห็นว่าที่จุด 5 และ 10 ของขดลวดเป็นจุดร้อนสุด ส่วนรูปที่ 14-15 เป็นผลการทำนายจากสมการที่ 26 เห็นได้ว่าในช่วงเวลาท้ายๆ มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบ ส่วนช่วงเวลาเริ่มต้นแตกต่างกันบ้างเพราะการทดสอบใช้เวลาเพียง 10 ชั่วโมง ซึ่งแตกต่างจากหม้อแปลงภาคสนามที่ต่อกับระบบตลอดเวลาซึ่งทำให้เกิดความร้อนสะสมอันเนื่องมาจากกำลังสูญเสียที่แกนเหล็กอยู่ในช่วงเริ่มต้นอยู่ก่อนแล้ว



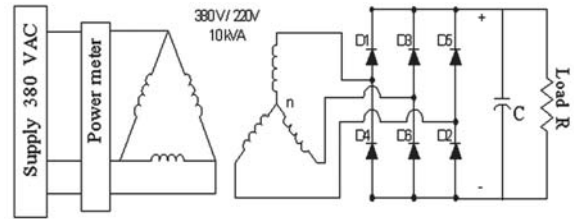
รูปที่ 7 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน



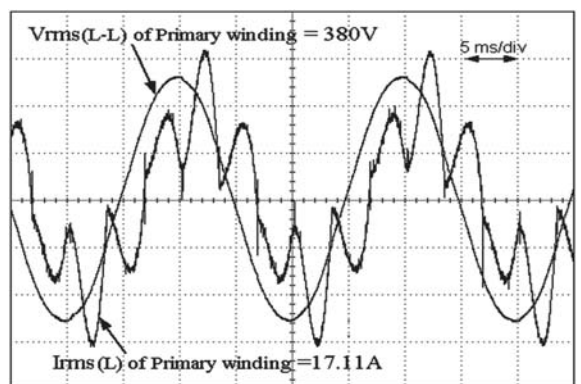
รูปที่ 9 การวัดอุณหภูมิแวลลุ่มรอบๆ หม้อแปลงที่ทดสอบ จำนวน 2 ตำแหน่ง



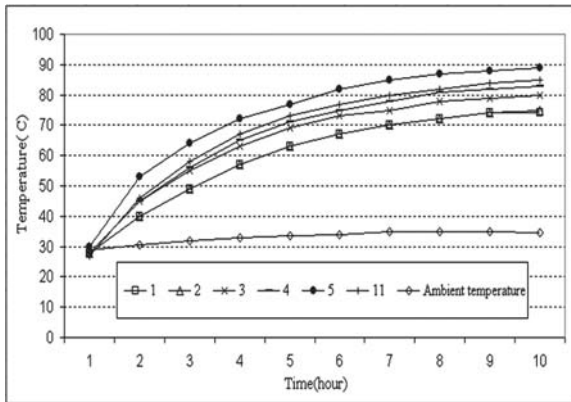
รูปที่ 8 ภาพจริงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ที่ขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำ



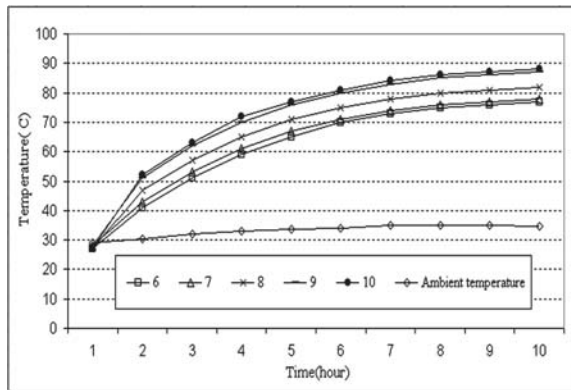
รูปที่ 10 วงจรการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง โดยใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 11 สัญญาณกระแสและแรงดันทางขดลวดแรงดันสูง



รูปที่ 12 ผลการทดสอบอุณหภูมิขดลวดแรงดันต่ำ

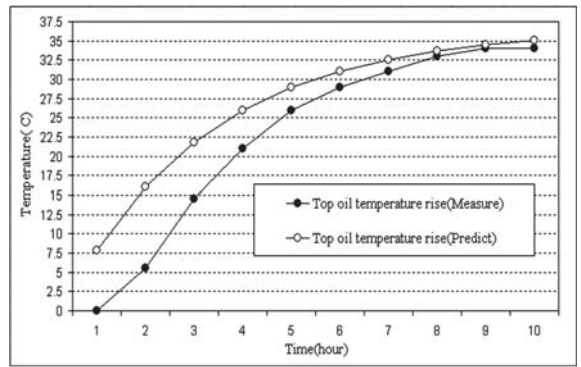


รูปที่ 13 ผลการทดสอบอุณหภูมิขดลวดแรงดันสูง

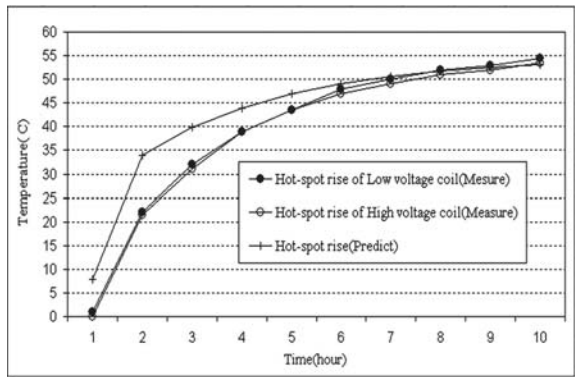
3.3 การวางแผนการจ่ายโหลดไฟฟ้าหม้อแปลง

ถ้าหม้อแปลงรับโหลดที่ไม่เกินพิกัดอายุใช้งาน [2] ประมาณไว้ที่ 20 ปี โดยตัวประกอบที่มีผลกับอายุใช้งานหม้อแปลงคือ 1. โหลดของหม้อแปลง 2. อุณหภูมิแวดล้อม เพื่อให้เห็นว่าตัวประกอบดังกล่าวมีผลกระทบต่ออายุใช้งานหม้อแปลงอย่างชัดเจน ในงานวิจัยนี้ได้จำลองวัฏจักรโหลดของหม้อแปลงในกรณีที่มีหม้อแปลงรับโหลดเกินพิกัดและอุณหภูมิแวดล้อมในกรณีต่างๆ เช่นพิจารณาเฉพาะค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปี, อุณหภูมิแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดปีและอุณหภูมิแวดล้อมที่มีการควบคุมให้คงที่ตลอดปี

จากสมการที่ 28 เป็นโมเดลคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งในสมการมีพารามิเตอร์ต่างๆ (θ_{ay} , A, B, D_x) ที่ต้องการทราบ การหาพารามิเตอร์เหล่านี้ทำได้โดยการนำ

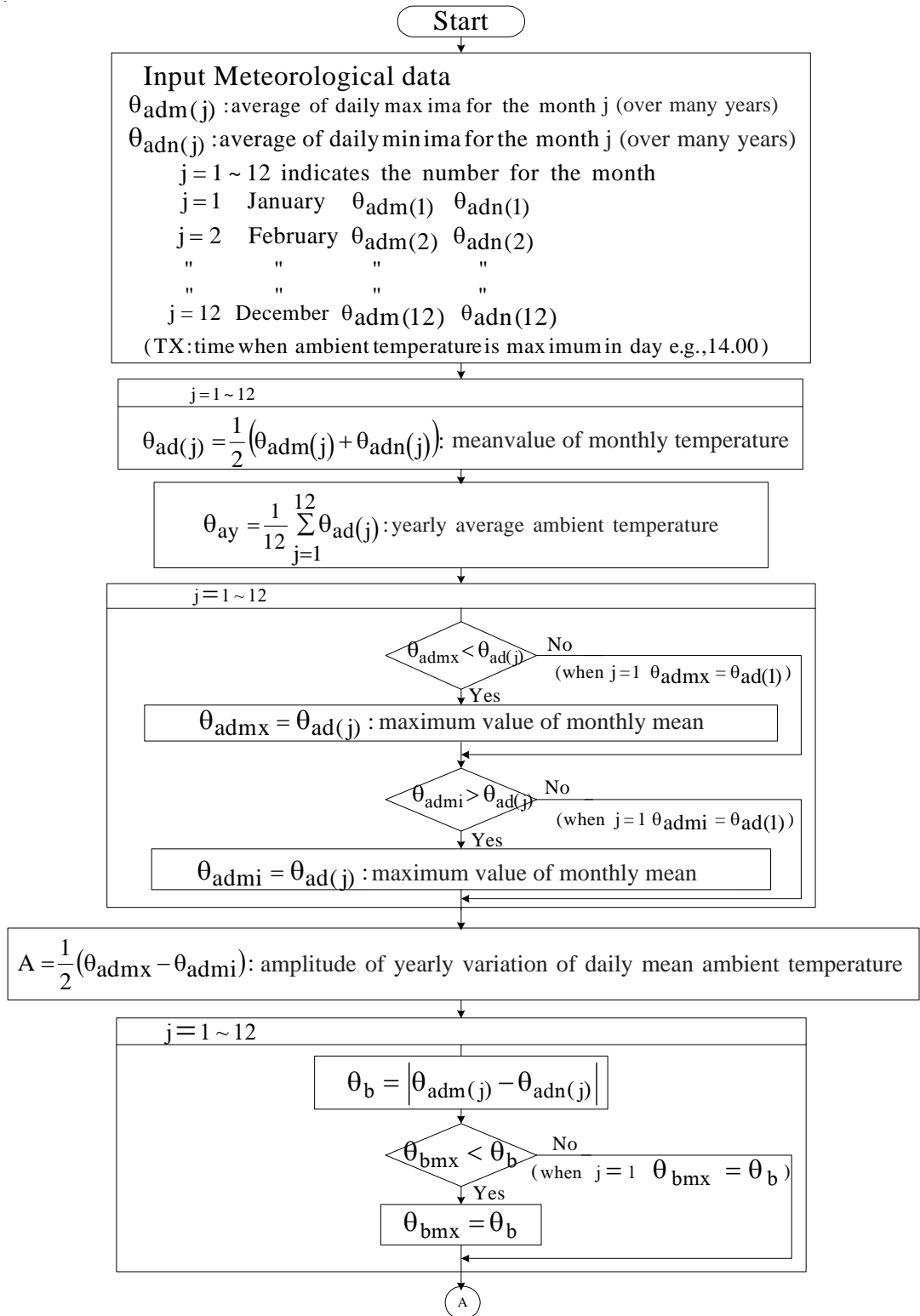


รูปที่ 14 การเปรียบเทียบการทดสอบจุดที่12และทำนายอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน

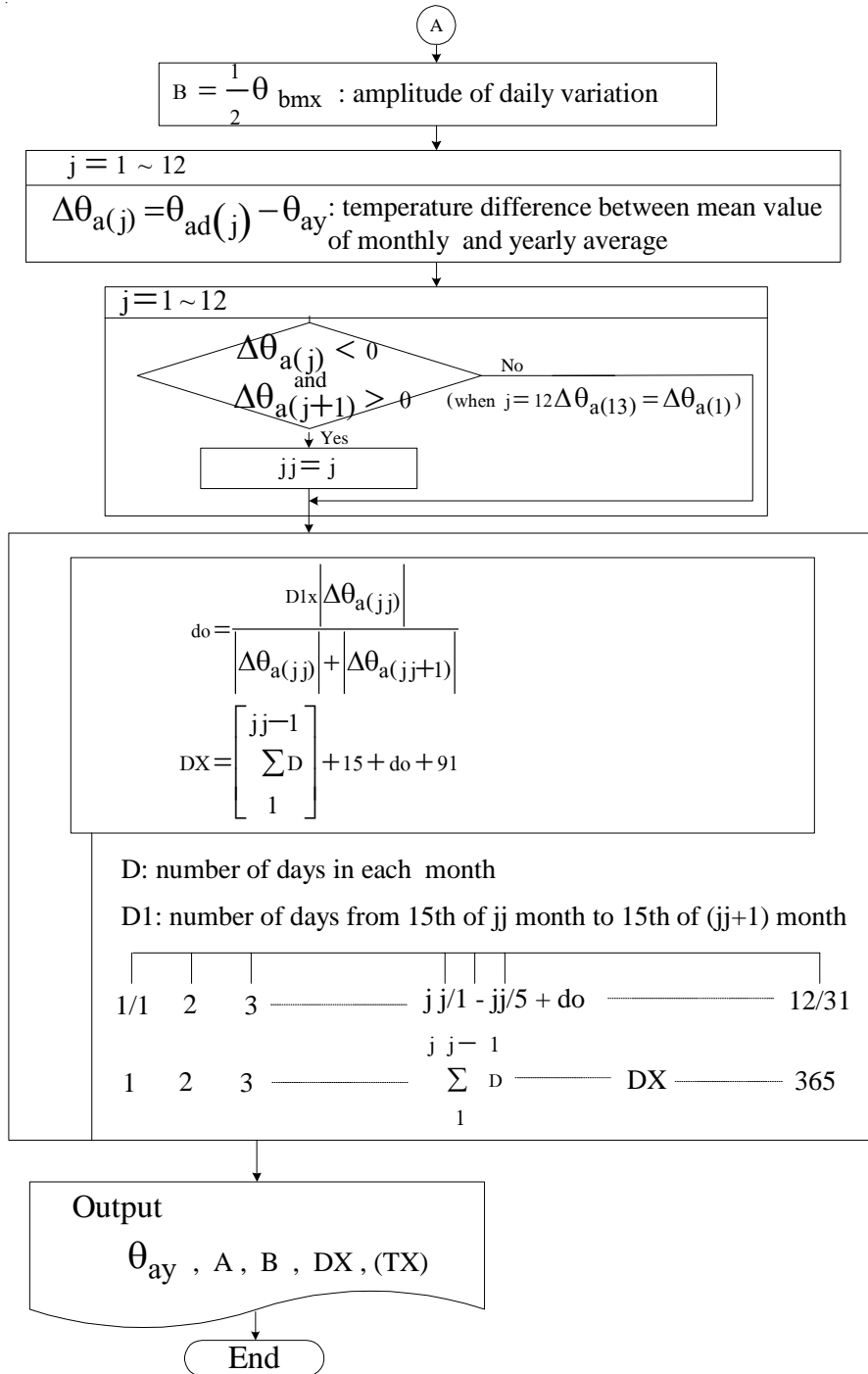


รูปที่ 15 การเปรียบเทียบการทดสอบและทำนายอุณหภูมิเพิ่มของจุดร้อนสุดของหม้อแปลง

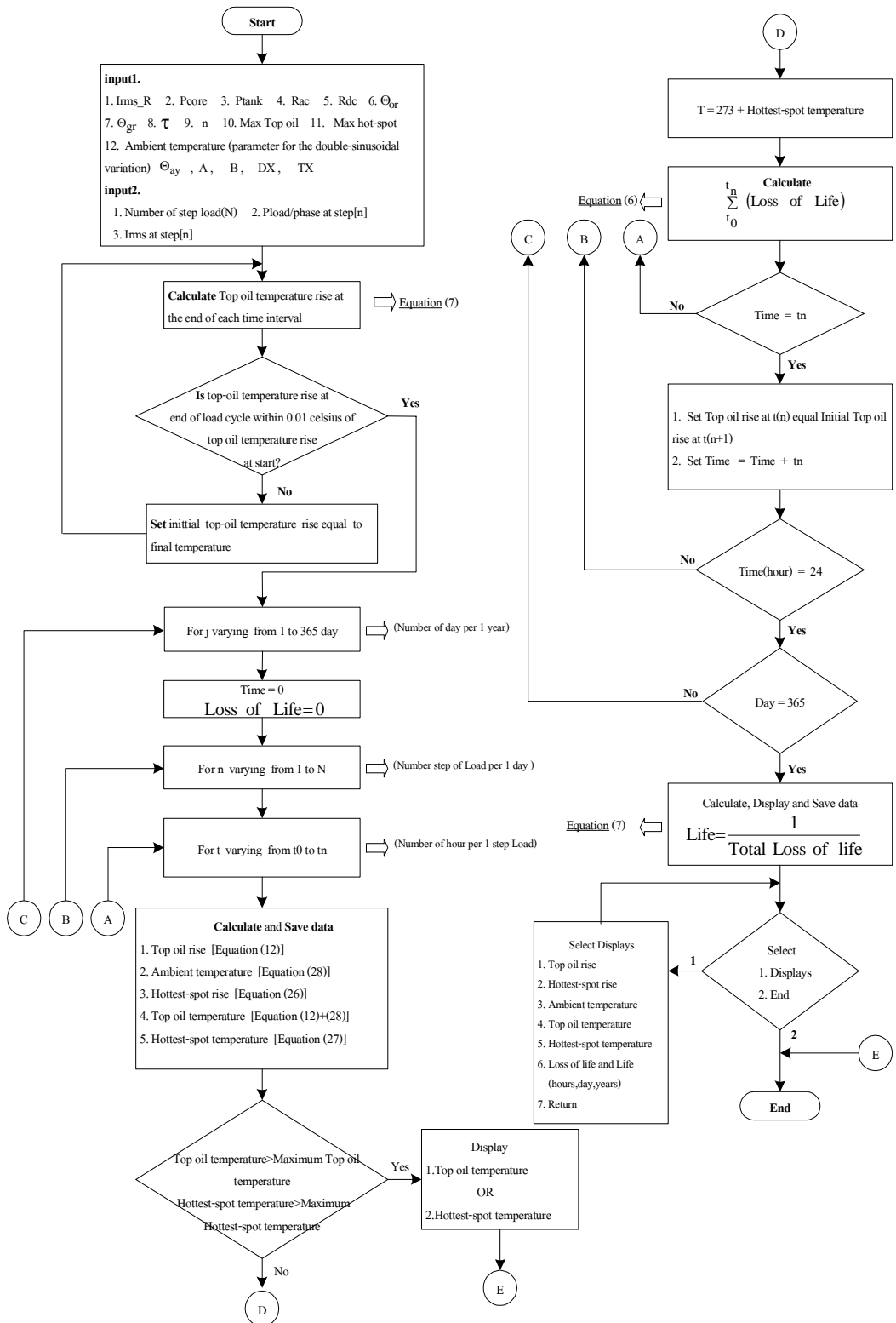
อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดเฉลี่ยและต่ำสุดเฉลี่ยของแต่ละเดือนของพื้นที่บริเวณที่ติดตั้งหม้อแปลงมาเป็นข้อมูลเบื้องต้น ในที่นี้เลือกพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ และพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งเก็บข้อมูลโดยกรมอุตุนิยมวิทยาในปี พ.ศ. 2544-2548 [11] ดังตารางที่ 4 คำนวณโดยใช้แผนผังรูปที่ 16 ซึ่งปรับมาจากแผนผังจาก [8] จากนั้นผู้วิจัยได้นำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงและทำนายอายุใช้งานหม้อแปลง [12] ในปี พ.ศ. 2549 โดยใช้แผนผังรูปที่ 17 ซึ่งเป็นแผนผังที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น และแผนผังทั้งหมดได้มีการพัฒนาอยู่ในรูปของโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่สามารถแสดงผลของค่า อุณหภูมิต่างๆ, %อายุสูญเสียและอายุใช้งานออกทางจอภาพและทางเครื่องพิมพ์และยังสามารถเก็บเป็นเพิ่มข้อมูลได้อีกด้วย



รูปที่ 16 แผนผังการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุณหภูมิแวดล้อม



รูปที่ 16 (ต่อ) แผนผังการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุณหภูมิแวดล้อม



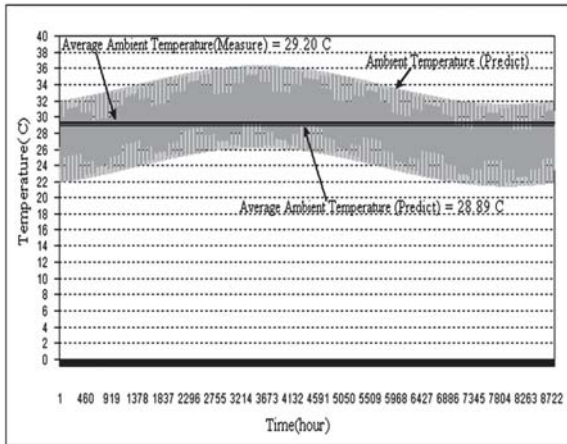
รูปที่ 17 แผนผังการคำนวณหาค่าอุณหภูมิต่างๆ, อายุสูญเสียและอายุใช้งานของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน

ตารางที่ 4 ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมเบื้องต้นที่ได้จากการเก็บข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา

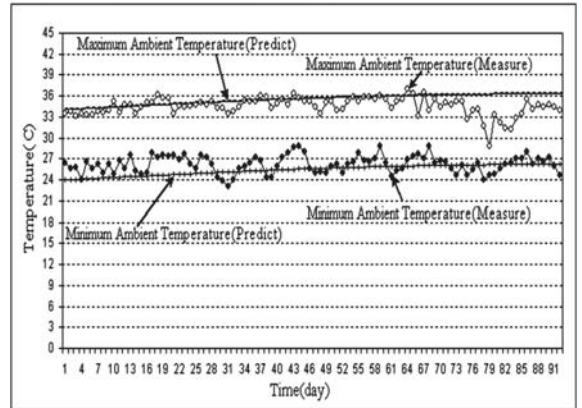
	พ.ศ. 2544											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
Mean maximum (θ_{adm})	32.8	33.7	33.1	36.1	33.7	33.4	33.4	33.1	33.7	32.3	30.7	31.2
Mean minimum (θ_{adn})	23.8	23.9	24.9	27.7	25.2	25.5	26.0	25.5	24.8	24.7	21.9	21.9
	พ.ศ. 2545											
	Mean maximum (θ_{adm})	31.8	33.4	33.9	35.8	34.4	34.2	33.7	32.7	32.6	32.7	32.1
Mean minimum (θ_{adn})	21.4	24.4	25.8	26.8	26.1	25.7	26.1	25.1	25.0	24.4	24.0	23.7
	พ.ศ. 2546											
	Mean maximum (θ_{adm})	31.6	33.1	34.8	34.6	34.6	33.5	32.3	33.1	32.2	32.1	33.4
Mean minimum (θ_{adn})	21.0	23.8	23.2	26.1	25.8	25.2	24.9	25.5	24.8	24.7	23.9	20.4
	พ.ศ. 2547											
	Mean maximum (θ_{adm})	31.9	31.6	33.9	35.9	34.0	33.3	33.7	32.9	32.6	33.3	33.9
Mean minimum (θ_{adn})	21.7	22.6	25.9	27.2	26.2	25.7	25.6	25.3	24.9	24.5	24.7	20.3
	พ.ศ. 2548											
	Mean maximum (θ_{adm})	31.8	33.3	33.8	35.0	34.5	33.6	33.2	33.2	32.7	32.8	31.9
Mean minimum (θ_{adn})	21.6	25.6	25.5	27.3	26.6	26.8	26.0	25.8	25.1	24.8	23.9	21.8
	พ.ศ. 2544 - พ.ศ. 2548											
	Average Mean maximum (θ_{adm} Average)	31.98	33.02	33.9	35.48	34.24	33.6	33.26	33	32.76	32.64	32.4
Average Mean minimum (θ_{adn} Average)	21.9	24.06	25.06	27.02	25.98	25.78	25.72	25.44	24.92	24.62	23.68	21.62

จากรูปที่ 18 เป็นผลการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ [11] และค่าที่ทำนายของอุณหภูมิแวดล้อม ค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปีจากการวัด (29.20°C) มีค่าใกล้เคียงกับการทำนายมาก (28.89°C) ส่วนรูปที่ 19 เป็นผลการทำนายช่วงเดือนที่มีอุณหภูมิสูงของปี จากรูปที่ 20 ค่าจากการทำนายและวัดได้ [11] มีค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกันโดยประมาณ สังเกตเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดมากที่สุดอยู่ใน

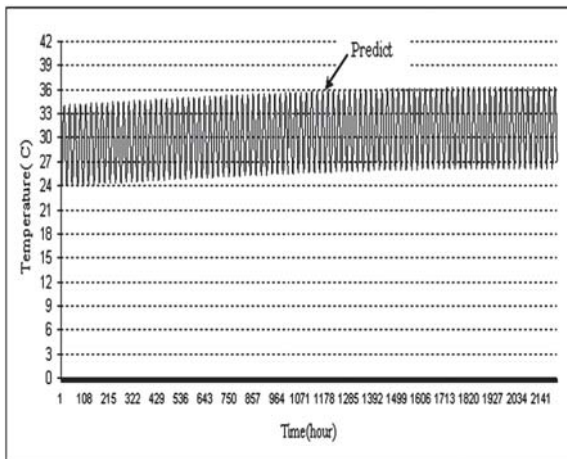
ช่วงประมาณกลางเดือนพฤษภาคม (75 ถึง 85) ที่ลดลงอย่างรวดเร็วอันเนื่องจากสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ จากนั้นกลับขึ้นมาเหมือนเดิม แต่ก็ถือว่าเป็นความโชคดีบนค่าผิดพลาดนี้ เพราะไม่ส่งผลเสียกับหม้อแปลงแต่อย่างใด แต่ยังทำให้หม้อแปลงสามารถจ่ายโหลดได้มากกว่าเดิมอีก ส่วนรูปที่ 21 เป็นการทำนายอุณหภูมิแวดล้อมตลอด 24 ชั่วโมง



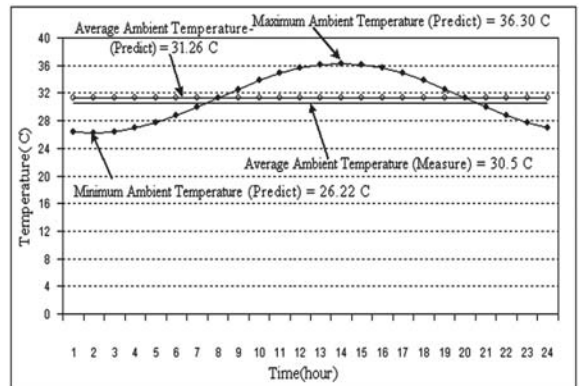
รูปที่ 18 อุณหภูมิแวดล้อมของแต่ละชั่วโมงตลอดปี พ.ศ. 2549
 $\theta_{ay} = 28.89\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A = 2.375$, $B = 5.04$, $Dx = 148$,
 $Tx = 14.00$



รูปที่ 20 อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุดและต่ำสุดของช่วงวันที่ 1
 มี.ค. ถึง 31 พ.ค. พ.ศ. 2549 (92 วัน)



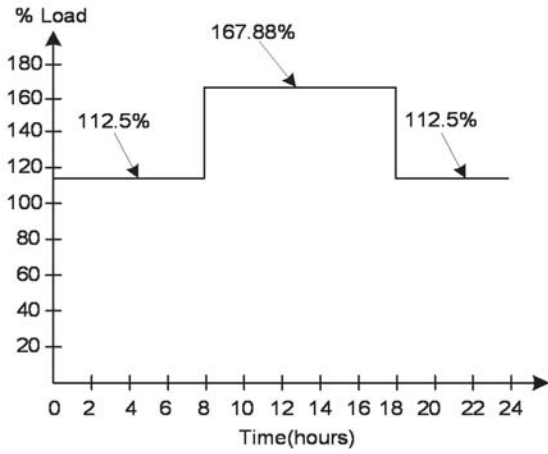
รูปที่ 19 อุณหภูมิแวดล้อมเดือน มี.ค. - พ.ค. พ.ศ. 2549
 (เดือนที่ร้อนมากของปี)



รูปที่ 21 อุณหภูมิแวดล้อมวันที่ 28 พ.ค. 2549 (ค่าสูงสุด
 ทำนายได้ 36.30 °C, [11] วัดได้ 34.5 °C)

3.4 การจำลองหาค่าอุณหภูมิและอายุใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีกับอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปี ในที่นี้ได้จำลองวัฏจักรโหลตที่มากกว่า พิกัดหม้อแปลงดังรูปที่ 22 ส่วนค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการ

จำลองของวันที่ 28 พ.ค. 2549 แสดงดังรูปที่ 23-25 และผลการคำนวณค่า % อายุสูญเสียและอายุใช้งานแสดงดังตารางที่ 5 เห็นได้ว่าค่าอายุใช้งานของหม้อแปลงที่ทำนายได้แตกต่างกันถึง 4.1238 ปี



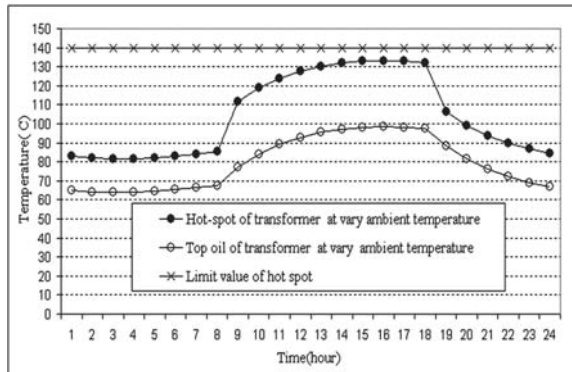
รูปที่ 22 วัฏจักรโหลดของหม้อแปลงในแต่ละวัน

ช่วงเวลาที่ 1 และช่วงเวลาที่ 3

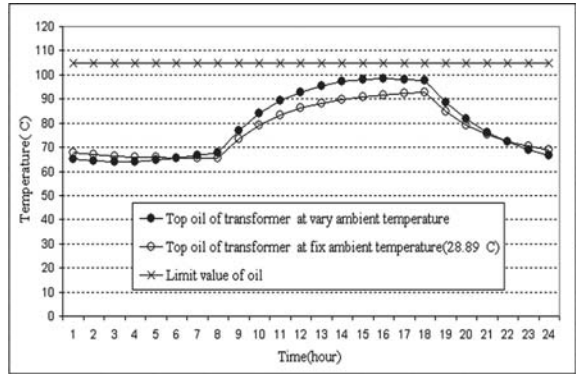
$I_{rms}(pri)/phase = 9.88A$ (112.5%) ประกอบด้วย
 $I_{h1} = 8.78 A$ (พิกัดหม้อแปลง100%), $I_{h5} = 4A$, $I_{h7} = 1.9A$,
 $I_{h11} = 0.5A$, $I_{h13} = 0.35A$

ช่วงเวลาที่ 2

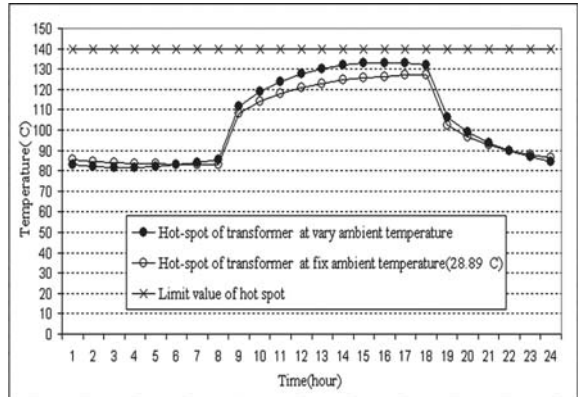
$I_{rms}(pri)/phase = 14.74A$ (167.88%) ประกอบด้วย
 $I_{h1} = 13.17A$, $I_{h5} = 5.9A$, $I_{h7} = 2.8A$, $I_{h11} = 0.78A$,
 $I_{h13} = 0.5A$



รูปที่ 23 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดหม้อแปลง



รูปที่ 24 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี



รูปที่ 25 เปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี

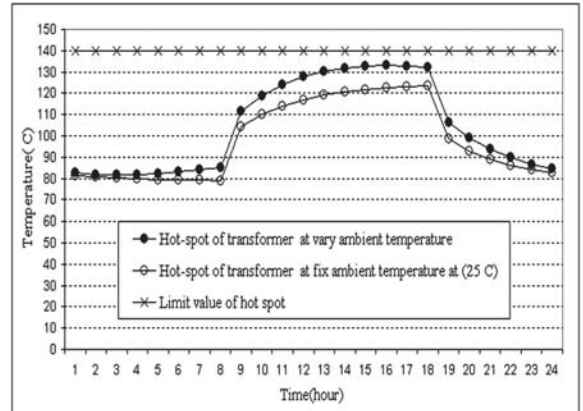
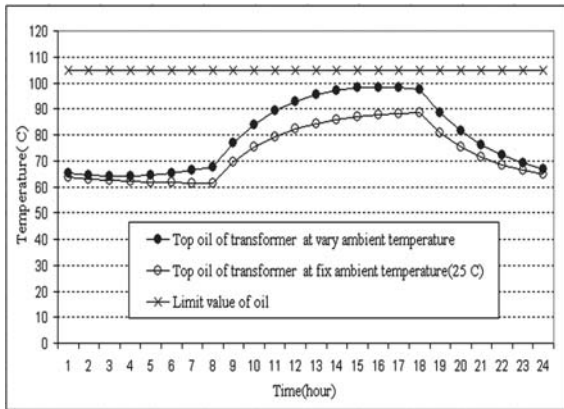
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบ %อายุสูญเสีย และอายุใช้งาน

	%อายุสูญเสีย (%Loss of Life)	อายุใช้งาน,ปี (Life)
อุณหภูมิแวดล้อม แปลงเปลี่ยนแปลงตลอดปี	10.45	9.5692
อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ ตลอดปี ที่ 28.89 °C	7.30	13.693

3.5 การจำลองหาค่าอุณหภูมิและอายุใช้งานเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีกับการควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมให้คงที่

ในกรณีที่สามารถควบคุมอุณหภูมิรอบๆ อาจติดตั้งระบบปรับอากาศควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C ให้กับหม้อแปลงตลอดเวลาหรือในช่วงเวลาจ่ายโหลดเกินปกติจะ

ช่วยยืดอายุใช้งานหม้อแปลงได้ ซึ่งค่าอุณหภูมิต่างๆ ของวันที่ 28 พ.ค. 2549 ได้เปรียบเทียบดังรูปที่ 26, 27 และผลการคำนวณค่า %อายุสูญเสีย และอายุใช้งาน แสดงดังตารางที่ 6 เห็นได้ว่าค่าอายุใช้งานที่ทำนายได้แตกต่างกันถึง 10.2 ปี



รูปที่ 26 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีและควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมที่ 25 °C

รูปที่ 27 เปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุด เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีและควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมที่ 25 °C

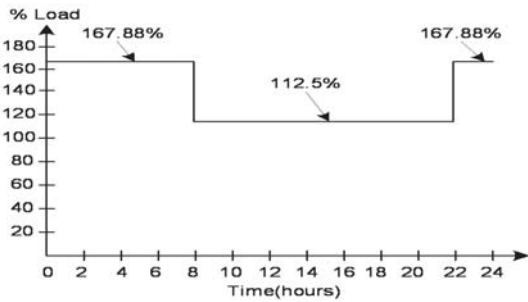
ตารางที่ 6 เปรียบเทียบ %อายุสูญเสีย และอายุใช้งาน

	%อายุสูญเสีย (%Loss of Life)	อายุใช้งาน, ปี (Life)
อุณหภูมิแวดล้อม แปลงเปลี่ยนตลอดปี	10.45	9.5692
อุณหภูมิแวดล้อมคงที่ ตลอดปี ที่ 25 °C	5.06	19.758

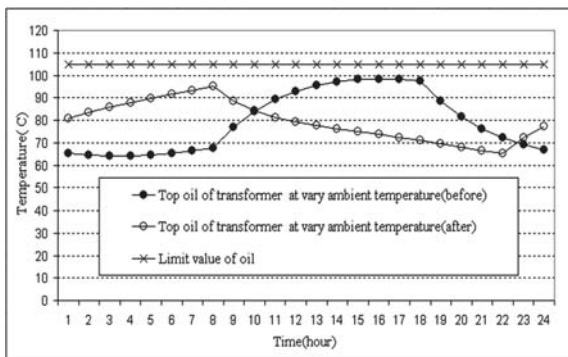
3.6 การจำลองหาค่าอุณหภูมิและอายุใช้งานเมื่อปรับเปลี่ยนช่วงเวลากการจ่ายโหลดของหม้อแปลง

ในกรณีที่สามารถปรับช่วงเวลากการจ่าย โหลดของหม้อแปลงได้ โดยปรับช่วงโหลดที่มีค่าสูงๆ ไว้ในช่วงเวลาที่อุณหภูมิแวดล้อมมีค่าต่ำสุดของวัน ซึ่งแสดงวัฏจักรโหลดของหม้อแปลงที่ปรับเปลี่ยนเวลาจากรูปที่ 22

เป็นรูปที่ 28 ผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุด, %อายุสูญเสีย และอายุใช้งานของหม้อแปลง เมื่อยังไม่มีการปรับเปลี่ยนและปรับเปลี่ยนช่วงเวลากการจ่ายโหลดของหม้อแปลงของวันที่ 28 พ.ค. 2549 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 29, 30 และตารางที่ 7 เห็นได้ว่าค่าอายุใช้งานของหม้อแปลงที่ทำนายได้แตกต่างกันถึง 7.53 ปี



รูปที่ 28 เมื่อปรับวัฏจักรโหลดของหม้อแปลงใหม่

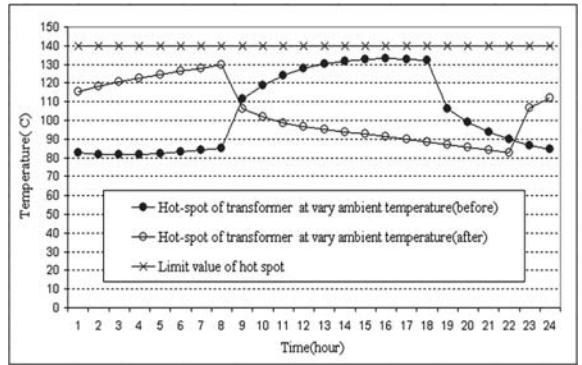


รูปที่ 29 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนเมื่อยังไม่ปรับวัฏจักรโหลดและปรับวัฏจักรโหลดใหม่

4. สรุปผลการวิจัย

กรณีที่โหลดไฟฟ้าของหม้อแปลงเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้อุณหภูมิของน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของตัวนำมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวนี้สามารถทำนายด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นได้

การวางแผนการจ่ายโหลดหม้อแปลงสรุปได้ดังนี้
 1. อายุใช้งานหม้อแปลงที่ได้จากการนำค่าอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีมาพิจารณาจะมีความแม่นยำกว่าใช้ค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปี
 2. อายุใช้งานหม้อแปลงที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมมีค่ามากกว่าอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี
 3. อายุใช้งานหม้อแปลงเมื่อมีการปรับวัฏจักรโหลดช่วงที่จ่ายโหลดสูงให้ทำงานในช่วงเวลาที่อุณหภูมิแวดล้อมต่ำๆ มีค่ามากกว่าที่วัฏจักรโหลด



รูปที่ 30 เปรียบเทียบอุณหภูมิจุดร้อนสุดเมื่อยังไม่ปรับวัฏจักรโหลดและปรับวัฏจักรโหลดใหม่

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบ %อายุสูญเสีย และอายุใช้งาน

	%อายุสูญเสีย (%Loss of Life)	อายุใช้งาน, ปี (Life)
อุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี (ก่อนปรับเวลา)	10.45	9.5692
อุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี (หลังปรับเวลา)	5.847	17.10

ช่วงที่จ่ายโหลดสูงให้ทำงานในช่วงเวลาที่อุณหภูมิแวดล้อมสูงๆ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะช่วยในการศึกษาเรื่องความร้อนและการวางแผนการจ่ายโหลดของหม้อแปลงแบบ斬้้ำมันเมื่อโหลดไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี

5. ข้อเสนอแนะ

1. หม้อแปลงทดสอบตัวที่ทำวิจัยนี้คณะผู้ทำวิจัยได้ออกแบบสร้าง โดยได้เพิ่มพื้นที่ผิวของถังหม้อแปลงมากขึ้นทำให้พารามิเตอร์จำเพาะ Θ_{or} และ Θ_{2r} มีค่าต่ำ ดังนั้น เพื่อให้เห็นภาพของงานวิจัยอย่างชัดเจน ผู้วิจัยจึงจำลองวัฏจักรโหลดหม้อแปลงที่เกินพิกัดสูงถึง 167.88% แต่ถ้าเป็นหม้อแปลงเชิงการค้าโดยทั่วๆ ไปที่โหลดเกินพิกัดต่ำกว่า 167.88% ก็ทำให้อุณหภูมิต่างๆ ของหม้อแปลงเกินพิกัดได้เช่นกัน

2. กรณีที่หม้อแปลงติดตั้งในพื้นที่อื่นๆ การจำลองการวางแผนการจ่ายโหลดสามารถทำได้โดยการนำข้อมูลของอุณหภูมิแวดล้อมเบื้องต้นของพื้นที่เขตนั้นๆ มาพิจารณาได้เช่นเดียวกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท พงษ์พิมาณการไฟฟ้า จำกัด ที่สนับสนุนสถานที่และเครื่องมือต่างๆ ในการทดสอบจนผลงานวิจัยนี้ลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

1. ลีริวิช ทัดสวน, วิจิตร กิณเรศ, นิทัศน์ กฤษณะจินดา, ศุภี บรรจงจิตร, และ บุญเลิศ สือเฉย, 2543, “การทดสอบอุณหภูมิ ณ บริเวณลวดตัวนำและบริเวณน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน เพื่อนำเป็นค่าบรรทัดฐานของการออกแบบหม้อแปลง,” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 23, ฉบับที่ 2, หน้า 59-77.

2. ANSI/IEEE C57.91 IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immerse Overhead and Pad-Mounted Distribution Transformers Rated 500kVA and Less with 65 °C Average Winding Rise. 1981.

3. ANSI/IEEE C57.92 IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immerse Overhead and Pad-Mounted Power Transformers, up to and Including 100 MVA with 65 °C or 55 °C Average Winding Rise. 1981.

4. ANSI/IEEE C57.115 IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immerse Overhead and Pad-Mounted Power Transformers Rated in Excess of 100 MVA 65 °C Winding Rise. 1981.

5. Linden W. Pierce, “Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load

Currents,” *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 32, No. 3, MAY/JUNE, 1996, pp. 633 -645

6. ลีริวิช ทัดสวน, ธีรวัฒน์ พัชรตระกูล, ธวัชชัย ธรรมประสิทธิ์, บุญเลิศ สือเฉย และ ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล, 2547, “การประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของแกนเหล็กหม้อแปลงที่ขนาดความหนาเบอร์ M4 เทียบกับเบอร์ M5 เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันเป็นสัญญาณชานัน์และไม่เป็นสัญญาณชานัน์,” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 1, หน้า 17-33.

7. ลีริวิช ทัดสวน, ธวัชชัย ธรรมประสิทธิ์, ชาญวิทย์ ตั้งสิริวรกุล และ เฉลิมชาติ มานพ. 2547, “การประมาณค่าสูญเสียแกนเหล็กหม้อแปลง 3 เฟส เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันไม่เป็นสัญญาณชานัน์,” *วิศวกรรมสาร ม.ช.*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 175-189.

8. Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer, IEC 354-1991.

9. IEEE Std C57.110-1998. IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Currents.

10. Bendapudi S. Ram, J. Alan C. Forrest, Glenn W. Swift, “Effect of Harmonic on Converter Transformer Load Losses,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, July, 1988, pp. 1059-1066.

11. กรมอุตุนิยมวิทยา เขตบางนา, Agroclimatology Data, 2001-2006.

12. ลีริวิช ทัดสวน, ธวัชชัย ธรรมประสิทธิ์, บุญเลิศ สือเฉย, วิจิตร กิณเรศ และ ศุภี บรรจงจิตร, 2545, “การจำลองสภาพวัฏจักรโหลดเพื่อศึกษาค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและอายุใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน,” *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 19, ฉบับที่ 2, หน้า 7-12.

