

การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบและการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย  
เพื่อปรับปรุงให้มีความสามารถทนกระแสลัดวงจร  
**Analysis and Evaluation of Tested Result  
and Design of Distribution Transformer  
for Improving Short Circuit Withstand Capability**

บุญเลิศ สือเจย\* , ันนา บัวสุวรรณ และ อดิศักดิ์ มนต์ประภัสสร  
Boonlert Suechoey\* , Tunwa Buasuwan and Adisak Monprapassorn

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์  
19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160  
\*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, email : boonlerts@sau.ac.th

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์และการประเมินผลของการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อให้มีความสามารถทนกระแสลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) โดยนำผลการทดสอบของหม้อแปลงจำหน่าย ขนาด 250 kVA 3 ph 50 Hz 22000-400/230 V Dyn11 ขณะจ่ายโหลดที่พิกัดตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมาทำการคำนวณและวิเคราะห์หาอุณหภูมิของขดลวดขณะจ่ายโหลดที่พิกัด, อุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดหลังจากการลัดวงจร, กระแสลัดวงจร, เวลาในการลัดวงจร และวิเคราะห์แรงขณะลัดวงจร โดยผลที่ได้นี้จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง สำหรับการออกแบบหม้อแปลงจำหน่ายครั้งต่อไป ทำให้ผู้ออกแบบสามารถค้นหาจุดบกพร่องในการออกแบบและการเลือกใช้วัตถุดิบในการผลิต เช่น ขนาดของลวดค้ำ, ความหนาของฉนวนและคุณสมบัติของแกนเหล็กที่นำมาใช้ในการผลิตได้อย่างเหมาะสม อันจะทำให้หม้อแปลงที่ได้ทำการวิเคราะห์ออกแบบมีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น สามารถทนกระแสลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ผลจากการประเมินวิเคราะห์และข้อมูลต่างๆ ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงต่อไปในอนาคตได้เป็นอย่างดี

**คำสำคัญ :** อุณหภูมิจุดร้อนสุด, อุณหภูมิหลังจากเกิดการลัดวงจร, แรงขณะลัดวงจรลัดวงจร

**Abstract :** This research presents the analysis and evaluation of transformer design for short circuit withstand capability as required by the PEA standard. The tested results at rated load of distribution transformer, 250 kVA 3 ph 50 Hz 22000-400/230 V Dyn11, and manufacturing guidelines while loading of distribution transformer, 250 kVA 3 ph 50 Hz 22000-400/ 230 V Dyn11, and manufacturing guidelines were calculated as the

data to analyze and to find out the winding temperature, the final temperature after the short circuit, short circuit current, short circuit duration and short circuit forces analysis. This analysis and evaluation is based on the design of distribution transformer, according to the PEA standard. This result is used as a reference for design the distribution transformer in next time and for designers to find out the defects in the design and to select of raw materials, such as wire size, insulation thickness, and the properties of the silicon steel that used in the production. This will approve the better performance of designing transformer and short circuit withstand capability as required by the standard. The results of the analysis and information are very useful as the essential data for designing and analysis of the transformer design in the future as well.

**Keywords:** Hottest Spot Temperature, Temperature After Short Circuit, Short Circuit Force

## 1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้า นับเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีเสถียรภาพและความปลอดภัยสูง ในการใช้งานหม้อแปลงในบางครั้งอาจจะมีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าหรือฉนวนของขดลวดเสื่อมสภาพทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าอาจเกิดการลัดวงจรขึ้นได้ ประกอบกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ได้ทำการปรับปรุงแก้ไขคุณสมบัติ (Specification) [1] ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายจะต้องผ่านการทดสอบการทนกระแสลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้นถ้าผู้ผลิตสามารถออกแบบและผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า ให้มีคุณสมบัติที่ดีทนต่อสภาวะการใช้งานตามมาตรฐานที่กำหนด ก็จะสามารถช่วยให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและเกิดความมั่นคงต่อระบบไฟฟ้ามากขึ้น เมื่อหม้อแปลงเกิดการลัดวงจรขึ้น จะทำให้กระแสในขดลวดสูงกว่ากระแสที่ปกติมากขึ้นหลายเท่า ซึ่งจะมีแรงกระทำกับขดลวดทำให้ขดลวดเสียรูปทรงและเสียหาย และยังจะมีผลทำให้อุณหภูมิของขดลวดสูงขึ้นตามไปด้วย ผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้ฉนวนได้รับความเสียหาย ถ้าหม้อแปลงได้รับการออกแบบที่เหมาะสมก็

จะทำให้หม้อแปลงสามารถทนต่อสภาวะนี้ได้ตามข้อกำหนด

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการนำผลจากการออกแบบหม้อแปลงและผลจากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์อุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดและขณะลัดวงจร และหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการลัดวงจรเพื่อนำผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นแนวทางและจะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการใช้งานหม้อแปลงปรับปรุงและพัฒนา การออกแบบให้หม้อแปลงใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและเป็นไปตามข้อกำหนดใหม่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง

ในการคำนวณหาอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจำหน่าย สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

2.1.1 อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด (Average Winding Temperature Rise) สามารถหาได้จากสมการ [2]

$$\Theta_{wr} = \Theta_{w2} - \Theta_a \quad (1)$$

$$\Theta_{w2} = \frac{R_{T2}}{R_{T1}} (k + \Theta_{w1}) - k \quad (2)$$

โดยที่

$\Theta_{wr}$  คือ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของขดลวด, °C

$\Theta_a$  คือ อุณหภูมิแวดล้อม, °C

$\Theta_{w2}$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่จุดตัดไฟ, °C

$R_{u1}$  คือ ความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิแวดล้อม,  $\Omega$

$R_{u2}$  คือ ความต้านทานของขดลวดที่จุดตัดไฟ,  $\Omega$

k คือ 234.5 สำหรับทองแดง และ 224.5 สำหรับ

อลูมิเนียม

2.1.2 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบนที่พิกัด โหลด (Top Oil Temperature Rise at Rated Load,  $\Theta_{or}$ ), สามารถหาได้จากสมการ

$$\Theta_{or} = \Theta_o - \Theta_a \quad (3)$$

โดยที่

$\Theta_{or}$  คืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบนที่พิกัด โหลด, °C

## 2.2 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงขณะลัดวงจร

ในการวิเคราะห์สภาวะลัดวงจร ของหม้อแปลงจะต้องทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

2.2.1 การคำนวณระยะเวลาการลัดวงจร (Short-Circuit Current Duration) สามารถคำนวณได้จากสมการ [3],[4],[5]

$$t = \frac{1250}{I^2} \quad (4)$$

โดยที่

t คือ ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)

$I = \frac{I_{sc}}{I_R}$  คือ กระแสลัดวงจรสมมาตรซึ่งเป็นค่าทวิคูณ

ของกระแสปกติ

หมายเหตุ

สมการที่ (4) ใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดไม่เกิน 500 kVA ส่วนหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นระยะเวลาในการลัดวงจรจะไม่เกิน 2 วินาที ตามค่ามาตรฐาน 2.2.2 การคำนวณกระแสลัดวงจร (Short Circuit Current Calculation) สามารถแบ่งการคำนวณได้ดังนี้

### 1. กระแสสมมาตร (Symmetrical Current)

สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC} = \frac{IR}{Z_T + Z_S} \quad (5)$$

โดยที่

$I_R$  คือ กระแสที่พิกัด(A)

$Z_T$  คือ อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็นค่าเปอร์ยูนิต

$Z_S$  คือ อิมพีแดนซ์ของระบบเป็นค่าเปอร์ยูนิต

หมายเหตุ

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการลัดวงจรที่ชั่วของหม้อแปลงโดยไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ (กระแสลัดวงจรมีค่าสูงสุด)

### 2. กระแสไม่สมมาตร (Asymmetrical Current)

สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{SC(plasym)} = KI_{SC} \quad (6)$$

โดยที่

$$K = [1 + (e^{-(\phi + \pi/2)r/x}) \sin \phi] \sqrt{2}$$

และ

e คือ base of nature logarithm  $\approx 2.718$

$\phi$  คือ  $\arctan x/r$ , (radian)

x/r คือ อัตราส่วนของผลของกระแสลัดต่อค่ารีแอกแตนซ์และค่าความต้านทาน

**2.3 การคำนวณอุณหภูมิของขดลวดขณะลัดวงจร**

อุณหภูมิสุดท้ายของขดลวด ขณะที่การลัดวงจรสิ้นสุด ( $T_f$ ) สามารถหาได้จากสมการ

$$T_f = (T_k + T_s) \cdot m(1 + E + 0.6m) + T_s \quad (7)$$

โดยที่

$$m = \frac{(w_s)t}{C(T_k + T_s)} \quad (8)$$

สมการที่ (8) จะเป็นสูตรโดยประมาณที่ใช้ในกรณีที่มีค่า  $m = 0.6$  และน้อยกว่า สำหรับค่า  $m$  ที่มีค่ามากกว่า 0.6 ค่า  $T_f$  จะสามารถหาได้จากสมการ

$$T_f = (T_k + T_s) \left[ \sqrt{e^{2m} + E(e^{2m} - 1)} - 1 \right] + T_s \quad (9)$$

โดยที่

$t$  คือ ระยะเวลาการลัดวงจร (วินาที)

$T_k$  คือ 234.5 สำหรับทองแดง

คือ 224.5 สำหรับอลูมิเนียม

$T_s$  คือ อุณหภูมิขณะเริ่มต้น(°C) โดยจะมีค่าดังนี้

(1) 30 °C ค่าอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temp.) บวกกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดบวกกับอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่ยอมรับ (จาก Spec.ของโรงงาน) หรือ

(2) 30 °C ค่าอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temp.) บวกกับค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดที่เพิ่มขึ้นของขดลวดตามข้อกำหนด (Specification) ของหม้อแปลงแต่ละชนิด

$$E = E_r \left[ \frac{T_k + T_f}{T_k + T_s} \right]^2 \quad (10)$$

โดยที่

$E_r$  คือ per-unit eddy current loss ที่อุณหภูมิอ้างอิง

$T_r$  คือ อุณหภูมิอ้างอิง (อุณหภูมิแวดล้อม 20 °C บวกกับอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่พิกัด)

$W_s$  คือ Short-Circuit resistance loss ของขดลวดที่อุณหภูมิเริ่มต้น; วัตต์/ปอนด์ ของวัสดุตัวนำ

$$W_s = \frac{W_r N^2}{M} \times \left( \frac{T_k + T_s}{T_k + T_r} \right) \quad (11)$$

โดยที่

$W_r$  คือ resistance loss ของขดลวดที่พิกัดกระแสและอุณหภูมิอ้างอิง; วัตต์

$N$  คือ ขนาดของกระแสลัดวงจรสมมาตร; แอมป์

$M$  คือ น้ำหนักของขดลวดตัวนำ; ปอนด์

$C$  คือ ค่าความจุความร้อนเฉลี่ยต่อปอนด์ของวัสดุตัวนำ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

กรณีขดลวดใช้วัสดุทองแดง

$$C = 174 + 0.0225(T_s + T_f) + 110 \left( \frac{A_i}{A_c} \right) \quad (12)$$

กรณีขดลวดใช้วัสดุอลูมิเนียม

$$C = 405 + 0.1(T_s + T_f) + 360 \left( \frac{A_i}{A_c} \right) \quad (13)$$

โดยที่

$A_i$  คือ พื้นที่หน้าตัดของฉนวน

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

**2.4 การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวรัศมี**

เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งตามแนวแกนที่กระทำกับขดลวด ทำให้เกิดแรงกระทำกับขดลวดตามแนวรัศมี (Radial Force;  $F_{ra}$ ) ส่วนประกอบของเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวรัศมี ที่กระทำกับขดลวด จะทำให้เกิดแรงกระทำกับ

ขดลวดตามแนวแกน(Axial Force; Fax) ซึ่งแรงกระทำทั้งสองจะทำให้ขดลวดเสียหาย ในสภาวะปกติแรงกระทำทั้งสองจะมีค่าเล็กน้อย แต่ถ้าหากหม้อแปลงเกิดการลัดวงจรกระแสและแรงทางแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงให้สามารถทนต่อสภาวะลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ผู้ออกแบบจะต้องทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ โดยแรงที่กระทำตามแนวรัศมีสามารถคำนวณได้ดังสมการ [6],[7]

$$F_{rad} = 0.628 \times \left( \frac{N \times I}{H_w} \right)^2 \times \pi \times D_m \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (14)$$

โดยที่

$D_m$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำและแรงสูง (มม.)

$H_w$  คือ ความสูงเฉลี่ยตามแนวแกนของขดลวด (มม.)

$N$  คือ จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

$I$  คือ กระแสประสิทธิผลของขดลวด

$r = \frac{1}{EZ}$  คือตัวประกอบกระแสเกิน (overcurrent factor)

$k = (1 + e^{\frac{-\pi R}{X}})$  คือ peak amplitude factor

### 2.5 การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวแกน

การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวแกน สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$F_{ax} = 0.628 \times \left( \frac{N \times I}{H^2 w} \right)^2 \times \pi \times D_m \times \left( d + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) \times (2K - 1) \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (N) \quad (15)$$

โดยที่

$d$  คือ ความกว้างของท่อระบายความร้อนหลัก (mm.)

$a_1, a_2$  คือ ความหนาของขดลวดตามแนวรัศมี (mm.)

ค่าอุปสรรค (hoop stress) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\sigma_t = 0.314 \times \left( \frac{N \times I}{H_w} \right) \times D_m \times J \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (16)$$

โดยที่

$\sigma_t$  คือ อุปสรรค (hoop stress) (N/mm<sup>2</sup>)

### 2.6 การคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดตามมาตรฐาน IEC

อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด ( $\theta_1$ ) ของขดลวด(ทองแดง) หลังจากเกิดการลัดวงจร สามารถคำนวณได้ดังสมการ [7]

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{J^2 t} - 1 \quad (17)$$

โดยที่

$\theta_0$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)

$J$  คือ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (A/mm<sup>2</sup>)

$t$  คือ เวลาในการลัดวงจร (วินาที)

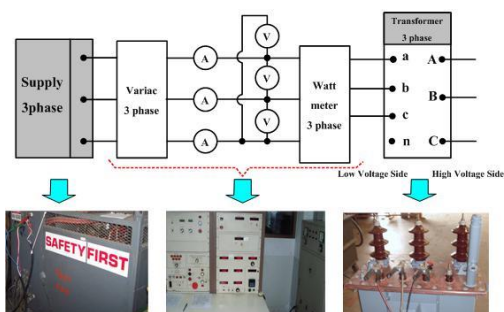
ตารางที่ 1 ค่าสูงสุดของอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวด หลังจาก เกิดการลัดวงจร ( $\theta$ )

| Transformer type | Insulation system temperature (°C) | Maximum values of $\theta$ |           |
|------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------|
|                  |                                    | Copper                     | Aluminium |
| Oil-immersed     | 105 (A)                            | 250°C                      | 200°C     |

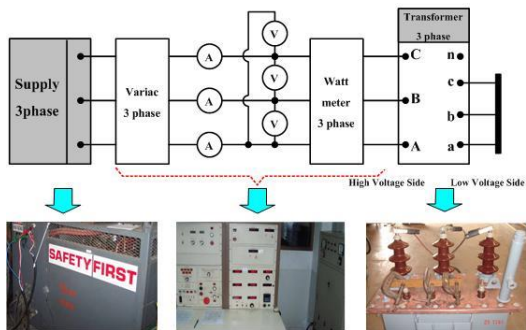
### 3. การทดสอบอุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่าย

ในการทดสอบอุณหภูมิ ของหม้อแปลงจำหน่ายในงานวิจัย ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด โดยสามารถทำได้ดังนี้ [2], [8], [9]

1. หม้อแปลงที่นำมาทำการทดสอบ เป็นหม้อแปลงชนิดจุ่มในน้ำมันที่ใช้ในระบบจำหน่าย ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคพิักัดขนาด 250 kVA 3ph 50Hz 22000-400/230V Dyn 11
2. การทดสอบจะทำการป้อนแรงดันด้านแรงสูง จนกระทั่งวัดมิเตอร์อ่านค่าได้เท่ากับค่าความสูญเสียรวม แล้วทำการบันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งค่าอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนมีค่าคงที่ 3 ชั่วโมงติดต่อกัน วงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 2 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะมีโหลด

โดยวิธีลัดวงจร

4. ผลการทดสอบ

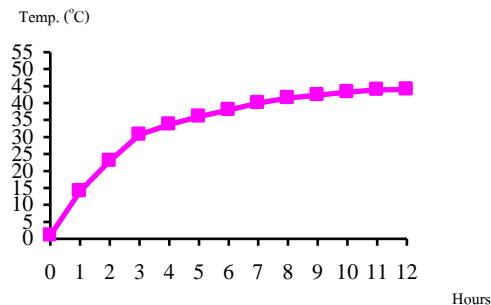
ผลการทดสอบหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดที่พิักัดเพื่อหาอุณหภูมิของน้ำมันและขดลวดแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหม้อแปลงขนาด 250 kVA

| พารามิเตอร์                      | ผลการทดสอบ |
|----------------------------------|------------|
| 1. No Load Loss (W)              |            |
| -Guarantee                       | 500        |
| -Test                            | 439.00     |
| 2. Load Loss (W)                 |            |
| -Guarantee                       | 2950       |
| -Test                            | 2686.00    |
| 3. Total loss (W)                | 3125.00    |
| 4. Hottest-spot of top oil. (°C) | 75.00      |
| 5. Hottest-spot of HV.Wdg. (°C)  | 82.44      |
| 6. Hottest-spot of LV.Wdg. (°C)  | 83.30      |
| 7. Top oil Temp rise . (°C)      |            |
| -Guarantee                       | 60         |
| -Test                            | 44.00      |
| 8. Winding Temp rise . (°C)      |            |
| -Guarantee                       | 65         |
| -HV. Winding                     | 51.44      |
| -LV. Winding                     | 52.30      |

พารามิเตอร์จากการออกแบบที่นำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ขณะทดสอบการทนการลัดวงจร (Short circuit withstand) แสดงดังตารางที่ 3

กราฟรูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันหม้อแปลงขนาด 250 kVA



รูปที่ 3 ผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนหม้อแปลง 250 kVA ที่พิักัดโหลด

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการคำนวณการทนการลัดวงจร(Short Circuit Withstand) หม้อแปลงขนาด 250 kVA

| พารามิเตอร์   | ด้านแรงสูง | ด้านแรงต่ำ |
|---|------------|------------|
| Reactance (%)                                       | 4.04       | -          |
| Resistance (%)                                      | 1.24       | -          |
| Per unit impedance                                  | 0.0423     | -          |
| Resistance / phase at 75 °C (ohm/phase)             | 20.14      | 0.004674   |
| Winding height (mm) : Hw                            | 353        | 375        |
| Number of turn per limb : N                         | 3300       | 33         |
| Current density of winding (A/mm <sup>2</sup> ) : J | 2.14       | 2.29       |
| Mean diameter of winding (mm) : Dm                  | 277        | 195        |
| Radial of winding 1 : a1                            | -          | 24         |
| Radial of winding 2 : a2                            | 31         | -          |
| Width of main duct (mm) : d                         | 11         |            |

ผลการคำนวณพารามิเตอร์ขณะลัดวงจรแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิหลังการทดสอบการทนการลัดวงจร (Short Circuit Withstand) หม้อแปลง 250 kVA

| พารามิเตอร์                            | ด้านแรงสูง | ด้านแรงต่ำ |
|--|------------|------------|
| Asymmetrical short circuit current (A) | 174.92     | 16664.06   |
| $\sigma_{mean}$                        | 23.95      | 16.18      |
| Radial force                           | 879.09     | 528.69     |
| Axial force                            | 66.14      | 37.76      |
| Final winding temperature (°C)         | 139.50     | 144.80     |

#### 4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากตารางที่ 2 จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิขดลวดและน้ำมันของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะใช้งานที่พิกัดโดยมีค่าต่างๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิเพิ่มของขดลวด ( $\Theta_{wr}$ ) โดยมาตรฐานกำหนดให้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 65 °C จากการทดสอบจะได้ค่าสูงสุดคือขดลวดแรงดันต่ำมีค่า 52.30 °C
2. อุณหภูมิของน้ำมันด้านบน ( $\Theta_o$ ), มีค่าเท่ากับ 75.0 °C
3. อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ( $\Theta_{ur}$ ) โดยมาตรฐานกำหนดให้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 60 °C จากการทดสอบจะได้ค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 44.00 °C

รูปที่ 3 เป็นผลการทดสอบอุณหภูมิน้ำมันของหม้อแปลงขณะใช้งานที่พิกัดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4 จะทำให้ทราบว่ากระแสลัดวงจรจะมีค่าสูงถึง 16664.06 Amp และอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดหลังจากลัดวงจรสูงมากถึง 144.80 °C ซึ่งตามมาตรฐานฉนวนของขดลวดหม้อแปลงจะมีระดับชั้นอุณหภูมิของฉนวน 105 °C ดังนั้นขณะหม้อแปลงเกิดการลัดวงจรขึ้นจะส่งผลให้ฉนวนของขดลวดและส่วนประกอบอื่นๆ เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ถ้าหากผู้ออกแบบสามารถทำการออกแบบหม้อแปลงโดยลดอุณหภูมิตรงส่วนนี้ลงได้ก็จะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพน้อยลงและทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานนานมากยิ่งขึ้น

#### 5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ ได้นำหม้อแปลงที่ได้ออกแบบแล้วนำมาสร้างหม้อแปลงต้นแบบขึ้น แล้วนำเสนอวิธีการทดสอบ คำนวนและ วิเคราะห์ผลอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดที่พิกัด และขณะลัดวงจรเพื่อหาค่าอุณหภูมิของขดลวด และพารามิเตอร์ของการทดสอบการทนการลัดวงจร โดยผลของการวิเคราะห์ตามตัวอย่างข้างต้นจะเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบ

สามารถทำการวิเคราะห์ห้ออกแบบ และตัดสินใจเลือก พารามิเตอร์และวัสดุที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลง เช่น ขนาดของลวดตัวนำความหนาของฉนวน, ชนิดและความหนาของเหล็ก ที่ใช้ทำแกนเหล็กของหม้อแปลง เพราะปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมานี้ มีผลโดยตรงต่อขดลวด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลอ้างอิงสำหรับใช้เป็นแนวทางในการใช้งาน และทำการวิเคราะห์ห้ออกแบบหม้อแปลง ให้สามารถทนต่อสภาวะลัดวงจรตามที่มาตรฐานกำหนด และยังสามารถช่วยในการวางแผนการจ่ายโหลด และการใช้งานหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น มีอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้น และยังสามารถช่วยค่าใช้จ่ายในการซ่อมและบำรุงรักษาได้อีกด้วย

สำหรับแนวทางในการพัฒนาต่อไปสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของการออกแบบหม้อแปลง รวมถึงการเลือกใช้วัสดุที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลง ที่มีกำลังไฟฟ้าขนาดต่างๆ ตามแนวทางของงานวิจัยนี้ ก็จะทำให้มีข้อมูลอ้างอิงจำนวนมากขึ้น ทำให้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบหม้อแปลงให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น มีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น และยังสามารถทำการวิเคราะห์ในเรื่องของ อายุฉนวนของหม้อแปลงได้อีกด้วย

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัททงษ์พิमानการไฟฟ้า จำกัด และบริษัท ที.ดี.ทรานสฟอร์เมอร์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนข้อมูลวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

[1] Provincial Electricity Authority Thailand (PEA), Three-Phase Transformer for 22 kV and 33 kV Distribution Systems with Ability to Withstand

Short Circuit, Specification No. RTRN-035/2558, 2015.

- [2] IEC 60076-2, Power Transformer Part 2 : Temperature Rise, 2011.
- [3] ANSI/IEEE C57.91, IEEE Guide for Loading Mineral Oil-Immersed Overhead and Pad Mounted Distribution Transformer Rated 500 kVA and Less with 65 °C or 55 °C Average Winding Rise, 1995.
- [4] IEC 354, Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer, 2006.
- [5] B. Suechoey, N. Chotiwanaporn, P. Jayasak, and C. Chompoo-inwai, "Proposition of Individual Guide for Distribution Transformer Design to Withstand Short Circuit Condition", *The 20<sup>th</sup> ICEE International Conference on Electrical Engineering*, Jeju, Korea, 2014.
- [6] B. Suechoey, W. Tangsrianukul, M. Leelajinda, and C. Chompoo-inwai, "Novel Techniques for Improving Short Circuit Withstand Capability of Distribution Transformer Considering Short Circuit Force and Winding Temperature", *The 21<sup>th</sup> ICEE International Conference on Electrical Engineering*, The University of Hong Kong, Hong Kong, 2015.
- [7] IEC 60076-5, Power Transformer Part 5: Ability to Withstand Short Circuit, 2006.
- [8] ANSI/IEEE C57.12.00, American National Standard IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, 2010.
- [9] Bharat Heavy Electrical Ltd., Transformer, Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi, 2<sup>nd</sup> Edition, 2003.

### ประวัติผู้ประพันธ์



รศ. ดร. บุญเลิศ สือเคย  
ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการ  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิต-  
วิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

### นายธันวา บัวสุวรรณ



จบการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัย  
เอเชียอาคเนย์ ปัจจุบันดำรง ตำแหน่ง  
วิศวกรไฟฟ้า