

การวิเคราะห์และออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายให้มี
ความสามารถทนกระแสลัดวงจร

**ANALYSIS AND DESIGN OF DISTRIBUTION TRANSFORMER FOR
SHORT CIRCUIT WITHSTAND CAPABILITY**

บุญเลิศ สื่อเฉย

อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160, tdler@hotmai.com

Boonlert Suechoey

Lecturer, Department of Electrical Engineering, Graduate School, Southeast Asia University

19/1 Phetchakasem Road, Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand, tdler@hotmai.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายให้มี
ความสามารถในการทนกระแสลัดวงจรได้ตามมาตรฐาน IEC ในการศึกษาจะทำการวิเคราะห์
อุณหภูมิของหม้อแปลงจำหน่ายชนิดจุ่มในน้ำมันขณะจ่ายโหลดและขณะลัดวงจร และทำการศึกษา
การปรับปรุงการออกแบบให้หม้อแปลงสามารถทนการลัดวงจรได้ ในงานวิจัยได้นำหม้อแปลง
จำหน่าย 400 kVA 3 เฟส 50 Hz 22000-400/230 V Dyn 11 ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
(PEA) มาทำการออกแบบใหม่ ทำการทดสอบ ทำการวัดและประมาณอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะ
ลัดวงจร อุณหภูมิของขดลวด อุณหภูมิจุดร้อนสุดของขดลวดหลังจากลัดวงจร กระแสลัดวงจร เวลา
ในการลัดวงจร และแรงขณะลัดวงจร โดยผู้ออกแบบจะทำการออกแบบและเลือกวัสดุเช่น ขนาด
ของขดลวด ความหนาของฉนวน แกนเหล็กซิลิกอน เพื่อให้การออกแบบและสามารถทำการ
ผลิตให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การออกแบบหม้อแปลง, การทนการลัดวงจร, อุณหภูมิของขดลวด

ABSTRACT

This article presents the study and analysis of the distribution transformer design for short
circuit withstand capability follow to IEC standard. In this study, the analysis of loading and
short circuit oil immersed distribution transformer and to improve the design of the

transformer can be short circuit withstand. In the research, the 400 kVA 3-phase 50 Hz 22000-400/230 V Dyn11 transformer has been designed and tested to measure and approximate the temperature of the transformer during short circuit the hottest spot temperature of the winding after a short circuit, the short circuit current, short circuit duration and short circuit forces. Which enabling designers to find a weak spot in the design and select a proper raw materials, such as winding size, insulation thickness and properties of the silicon steel for a better quality of distribution transformer production.

KEYWORDS: transformer design, short circuit withstand, winding temperature

1. บทนำ

ในปัจจุบัน พลังงานไฟฟ้าถือว่ามีผลต่อชีวิตประจำวันและระบบการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงมีความสำคัญต่อระบบการส่งและจ่ายไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าจึงถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบจำหน่าย เมื่อระบบจำหน่ายในบางครั้งอาจเกิดสิ่งผิดปกติขึ้น อาจส่งผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าและระบบการส่งและจ่ายไฟฟ้าขัดข้องไปด้วย ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตหม้อแปลง สาเหตุส่วนใหญ่ที่ทำให้หม้อแปลงเกิดปัญหาในการใช้งานก็คือเกิดจากการจ่ายโหลดเกิน ซึ่งจะส่งผลให้อาจเกิดการลัดวงจรภายใน เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นจะส่งผลให้ขดลวดของหม้อแปลงชำรุดเสียหายเนื่องจาก กระแสลัดวงจร แรงขณะลัดวงจร (Short circuit forces) อุณหภูมิของขดลวดขณะลัดวงจร อีกทั้งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) [1] ได้ประกาศใช้ข้อกำหนดใหม่ของหม้อแปลงจำหน่ายจะต้องผ่านการทดสอบการทนการลัดวงจร ดังนั้นถ้าสามารถทำการปรับปรุงการออกแบบหม้อแปลง โดยคำนึงถึงสถานะจ่ายโหลดเกิน สถานะลัดวงจร ก็จะช่วยทำให้สามารถใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังส่งผลให้ระบบจำหน่ายมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้จึงขอนำเสนอวิธีการพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบหม้อแปลงจำหน่าย ให้สามารถทนต่อสถานะการใช้งานโหลดเกิน และทนต่อการลัดวงจร (Short circuit withstand) ตามข้อกำหนดใหม่ของ PEA โดยทำการพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการลัดวงจร เช่น อุณหภูมิของขดลวด แรงขณะลัดวงจร ผลที่ได้จากการปรับปรุงออกแบบจะถูกนำไปทำการผลิตหม้อแปลงต้นแบบ แล้วทำการทดสอบหม้อแปลง ผลที่ได้จากการทดสอบจะเป็นข้อมูลที่ยืนยันได้ว่าสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ และวิเคราะห์พารามิเตอร์ของหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC และข้อกำหนดใหม่ของ PEA

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลง

อายุของฉนวนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะใช้งาน อายุของฉนวนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของหม้อแปลงมีค่าสูง ในการคำนวณอุณหภูมิเพิ่มของหม้อแปลงจำหน่าย สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [2]

2.1.1 อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด (Average winding temperature rise)

อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด สามารถหาได้จากสมการที่ (1) และ (2)

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

$$\Theta_{w2} = \frac{Rt_2}{Rt_1} (k + \Theta_{w1}) - T_k \quad (2)$$

โดยที่ Θ_{wr} คืออุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด ($^{\circ}\text{C}$), Θ_a คืออุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$), Θ_{w1} คืออุณหภูมิของขดลวดที่อุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$), Θ_{w2} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดที่จุดตัดไฟ ($^{\circ}\text{C}$), R_{t1} คือความต้านทานของขดลวดที่อุณหภูมิแวดล้อม (Ω), R_{t2} คือความต้านทานของขดลวดที่จุดตัดไฟ (Ω) และ T_k คือ 234.5 สำหรับทองแดง และ 224.5 สำหรับอลูมิเนียม

2.1.2 อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด (Top oil temperature rise at rated load, Θ_{or})

อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

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

โดยที่ Θ_{or} คือ อุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบน ($^{\circ}\text{C}$)

2.2 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงขณะลัดวงจร

ในการวิเคราะห์สภาวะลัดวงจรของหม้อแปลงต้องทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้ [3, 4]

2.2.1 การคำนวณระยะเวลาการลัดวงจร (Short-Circuit Current Duration)

การคำนวณระยะเวลาการลัดวงจร สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

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

โดยที่ t คือ ระยะเวลาการลัดวงจร(วินาที), $I = \frac{I_{SC}}{I_R}$ คือ กระแสลัดวงจรสมมาตรซึ่งเป็นค่าทวิคูณของกระแสปกติ

หมายเหตุ สมการที่ (4) ใช้กับหม้อแปลงที่มีขนาดไม่เกิน 500 kVA ส่วนหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นระยะเวลาในการลัดวงจรจะไม่เกิน 2 วินาที ตามค่ามาตรฐาน

2.2.2 การคำนวณกระแสลัดวงจร (Short circuit current calculation)

การคำนวณกระแสลัดวงจร สามารถแบ่งการคำนวณได้ดังนี้

1) กระแสสมมาตร (Symmetrical Current) สามารถหาได้จากสมการที่ (5)

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

โดยที่ I_R คือกระแสที่ฟักัด(A), Z_T คืออิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเป็นค่าเปอร์ยูนิต และ Z_S คืออิมพีแดนซ์ของระบบเป็นค่าเปอร์ยูนิต

หมายเหตุ ในบทความนี้จะกล่าวถึงการลัดวงจรที่ชั่วของหม้อแปลงโดยไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ (กระแสลัดวงจรมีค่าสูงสุด)

2) กระแสไม่สมมาตร (Asymmetrical current) สามารถหาได้จากสมการ

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

โดยที่ $K = [1 + (e^{-(\phi + \pi/2)r/x})\sin\phi]\sqrt{2}$, e คือ base of nature logarithm ≈ 2.718 , ϕ คือ $\arctan x/r$, in radian และ x/r คือ อัตราส่วนของผลของกระแสลัดต่อค่ารีแอคแตนซ์และค่าความต้านทาน

2.2.3 การคำนวณอุณหภูมิของขดลวดขณะลัดวงจร

อุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดขณะที่การลัดวงจรสิ้นสุด (T_f) สามารถหาได้จากสมการที่ (7)

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

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

สมการที่ 8 จะเป็นสูตรโดยประมาณที่ใช้ในกรณีที่ค่า $m = 0.6$ และน้อยกว่า สำหรับค่า m ที่มีค่ามากกว่า 0.6 ค่า T_f สามารถหาได้จากสมการที่ (9)

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

โดยที่ t คือระยะเวลาการลัดวงจร(วินาที), T_k คือ 234.5 สำหรับทองแดง และคือ 224.5 สำหรับอลูมิเนียม

T_s คือ อุณหภูมิขณะเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$) โดยจะมีค่าดังนี้

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

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

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

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

กรณีขดลวดใช้วัสดุทองแดง

$$C = 174 + 0.0225(T_s + T_f) + 110\left(\frac{A_i}{A_c}\right) \quad (11)$$

กรณีขดลวดใช้วัสดุอลูมิเนียม

$$C = 405 + 0.1(T_S + T_f) + 360\left(\frac{A_i}{A_c}\right) \quad (12)$$

โดยที่ A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของฉนวน และ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ

2.3 การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวรัศมี

เส้นแรงแม่เหล็กรัศมีตามแนวแกนที่กระทำกับขดลวดจะทำให้เกิดแรงกระทำกับขดลวดตามแนวรัศมี (Radial Force; F_{ra}) ส่วนประกอบของเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวรัศมีที่กระทำกับขดลวดจะทำให้เกิดแรงกระทำกับขดลวดตามแนวแกน (Axial Force; F_{ax}) ซึ่งแรงกระทำทั้งสองจะทำให้ขดลวดเสียหาย ในสภาวะปกติแรงกระทำทั้งสองจะมีค่าเล็กน้อย แต่ถ้าหากหม้อแปลงเกิดการลัดวงจร กระแสและแรงทางแม่เหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมาก ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงให้สามารถทนต่อสภาวะลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด ผู้ออกแบบจะต้องทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ แรงกระทำตามแนวรัศมีสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (13) [5]

$$F_{rad} = 0.628 \times \left(\frac{(N \times I)^2}{H_w}\right) \times \pi \times D_m \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (13)$$

โดยที่ D_m คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของขดลวดแรงต่ำและแรงสูง (มม.), H_w คือความสูงเฉลี่ยตามแนวแกนของขดลวด (มม.), N คือจำนวนรอบของขดลวด (รอบ), I คือกระแสประสิทธิผลของขดลวด, $r = \frac{1}{EZ}$ คือตัวประกอบกระแสเกิน (overcurrent factor) และ $k = \left(1 + e^{\left[\frac{-\pi R}{X}\right]}\right)$ คือ Peak amplitude factor

2.4 การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวแกน

การคำนวณแรงขณะลัดวงจรตามแนวแกน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (14) [5]

$$F_{ax} = 0.628 \times \left(\frac{(N \times I)^2}{(H^2 w)}\right) \times \pi \times D_m \times \left(d + \frac{a_1 + a_2}{3}\right) \times (2K - 1) \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (14)$$

โดยที่ d คือความกว้างของท่อระบายความร้อนหลัก (main duct) (mm.), a_1 และ a_2 คือ ความหนาของขดลวดตามแนวรัศมี (mm.)

ค่าอุปสรรค (hoop stress) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (15)

$$\sigma_t = 0.314 \times \left(\frac{N \times I}{H_w} \right) \times D_m \times J \times r^2 \times (k\sqrt{2})^2 \times 10^{-6} \quad (15)$$

โดยที่ σ_t คือ ค่าอุปสรรค (hoop stress) (N/mm²)

2.5 การคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดตามมาตรฐาน IEC

อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด (θ_1) ของขดลวดหลังจากลัดวงจร สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (16) [6]

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{J^2 t} - 1 \quad (16)$$

โดยที่ θ_0 คืออุณหภูมิเริ่มต้น (°C), J คือความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (A/mm²) และ t คือเวลาในการลัดวงจร(วินาที)

ตารางที่ 1 ค่าสูงสุดของอุณหภูมิเฉลี่ยของขดลวดหลังจากลัดวงจร (θ_1)

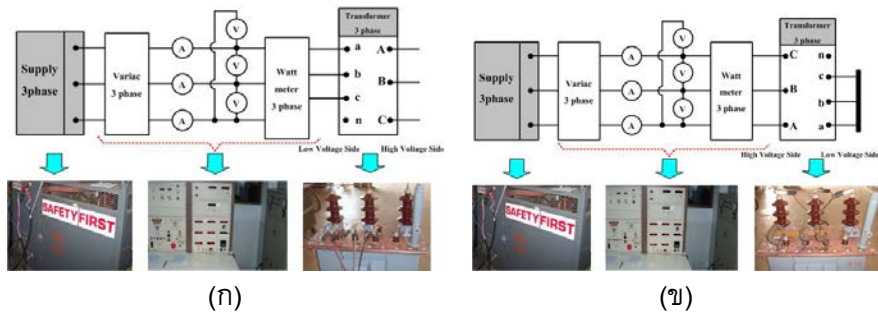
Transformer type	Insulation system temperature (°C)	Maximum values of θ_1	
		Copper	Aluminium
Oil-immersed	105 (A)	250 °C	200 °C

3. การทดสอบและผลการทดสอบ

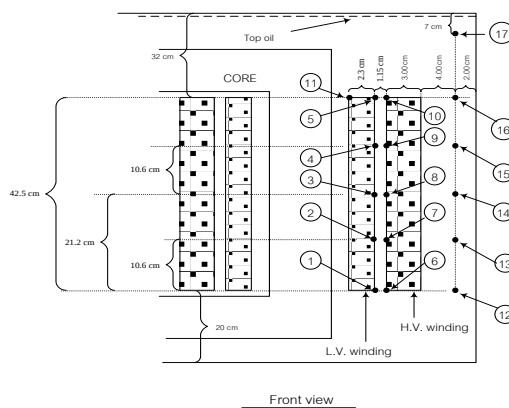
3.1 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม [1, 2, 7, 8]

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายขนาด 400 kVA 3 เฟส 50 Hz 22000-400/230V เวกเตอร์กรุป Dyn 11 ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและมาตรฐาน IEC วงจรทดสอบดังรูปที่ 1 และจะทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของหม้อแปลง โดยทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 2

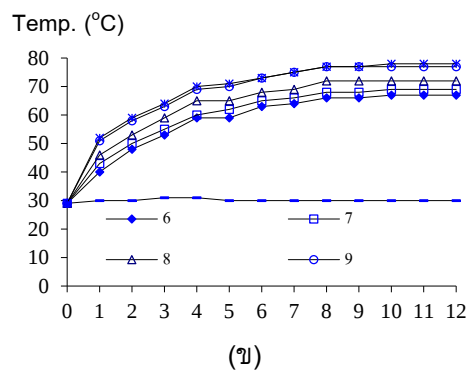
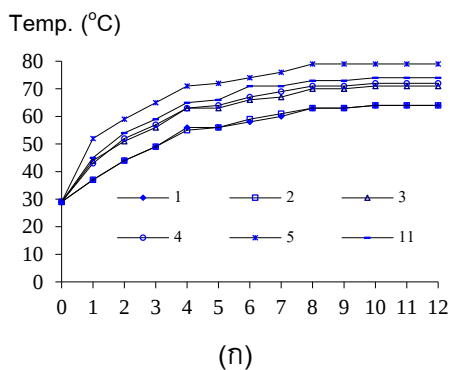
การทดสอบจะใช้วิธีการทดสอบแบบลัดวงจรดังรูปที่ 2 โดยทำการป้อนแรงดันจนมีค่าเท่ากับค่าความสูญเสียรวมของหม้อแปลง (IEC std.) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 4



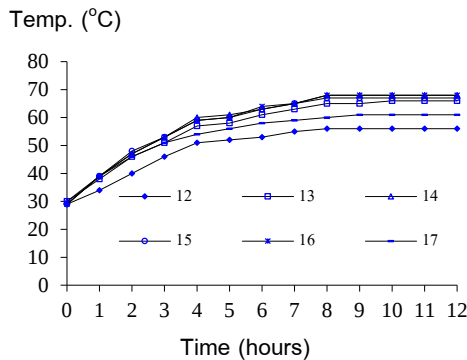
รูปที่ 1 (ก) วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะไม่มีโหลด (ข) วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดโดยวิธีลัดวงจร



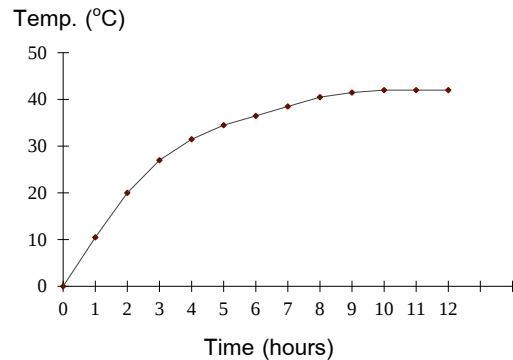
รูปที่ 2 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหม้อแปลงหม้อแปลง



รูปที่ 3 (ก) ผลการทดสอบอุณหภูมิของขดลวดแรงดันต่ำที่ตำแหน่ง 1, 2, 3, 4, 5 และ 11 (ข) ผลการทดสอบอุณหภูมิของขดลวดแรงดันสูงที่ตำแหน่ง 6, 7, 8, 9, 10 และอุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) ผลการทดสอบอุณหภูมิของน้ำมันที่ตำแหน่ง 12, 13, 14, 15, 16 และ 17
(ข) ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหนด (ตำแหน่งที่ 17)

3.2 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงที่ได้จากการทดสอบ

จากผลการทดสอบสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของขดลวดและน้ำมันแสดงได้ดังตารางที่ 2

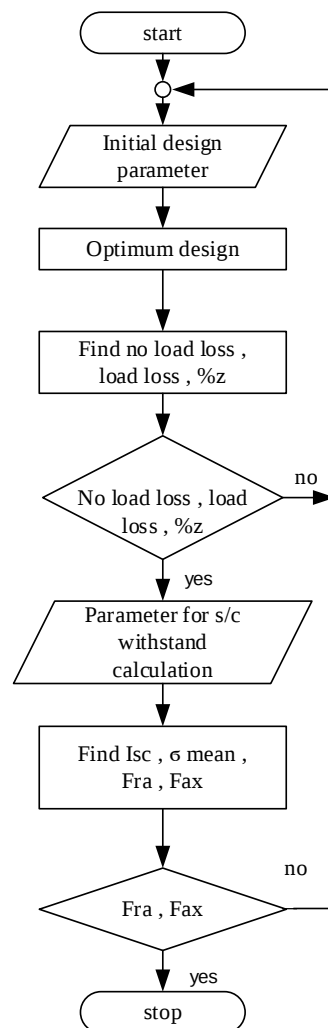
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของอุณหภูมิขดลวดและน้ำมันที่ได้จากการทดสอบ

พารามิเตอร์	ผลที่ได้	พารามิเตอร์	ผลที่ได้
Θ_{w1} (°C) HV	31.00	Θ_{w2} (°C) HV	76.70
Θ_{w1} (°C) LV	31.00	Θ_{w2} (°C) LV	78.80
R_{t1} (Ω) HV	9.13	R_{t2} (Ω) HV	10.82
R_{t1} (Ω) LV	0.00103	R_{t2} (Ω) LV	0.00122
Θ_{wr} (°C) HV	45.70	Θ_o (°C)	73.00
Θ_{wr} (°C) LV	47.80	Θ_{or} (°C)	42.00

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 2 จะเห็นว่าอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดมีค่าไม่เกิน 65 °C และค่าของอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันมีค่าไม่เกิน 60 °C ซึ่งผลทดสอบที่ได้มีค่าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด [2, 8, 9] ผลทดสอบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันที่พิกัดโหนดแสดงได้ดังรูปที่ 4 (ข)

3.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบพารามิเตอร์การทนการลัดวงจรของหม้อแปลงระหว่างการออกแบบแบบเดิมกับการออกแบบใหม่ที่น่าสนใจในงานวิจัย [10]

ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบพารามิเตอร์การทนการลัดวงจรของหม้อแปลง จะทำการออกแบบใหม่แล้วนำผลการออกแบบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการออกแบบเดิม การออกแบบจะทำการออกแบบแกนเหล็ก ขดลวดและฉนวน และวิเคราะห์พารามิเตอร์จากการออกแบบให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด โดยจะพิจารณาผลของการออกแบบใหม่ ให้มีค่าพารามิเตอร์การทนการลัดวงจรของหม้อแปลงต่ำกว่าเดิม การวิเคราะห์ทำได้ดังขั้นตอนตามรูปที่ 5 ผลของการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3-5



รูปที่ 5 แผนผังการออกแบบหม้อแปลงอย่างเหมาะสมและการคำนวณพารามิเตอร์ของการทนการลัดวงจร

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบผลการออกแบบหม้อแปลงระหว่างการออกแบบแบบเดิมกับการออกแบบใหม่

พารามิเตอร์	400 kVA	
	แบบเดิม	แบบใหม่
1. No Load Loss(w)		
-Guarantee	720	720
-Test	700.5	610.0
2. Load Loss(w)		
-Guarantee	4150	4150
-Test	4040.3	3949.3
3. Total Loss(w)	4740.3	4559.3
4. Hottest-Spot of Top Oil (°C)	81.0	73.0
5. Hottest-Spot of HV.wdg. (°C)	88.3	76.7
6. Hottest-Spot of LV.wdg. (°C)	89.8	78.8
7. Top Oil Temp Rise (°C)		
-Guarantee	60	60
-Test	51.0	42.0
8. Winding Temp Rise (°C)		
-Guarantee	65	65
-HV. Winding	60.3	45.7
-LV. Winding	61.8	47.8

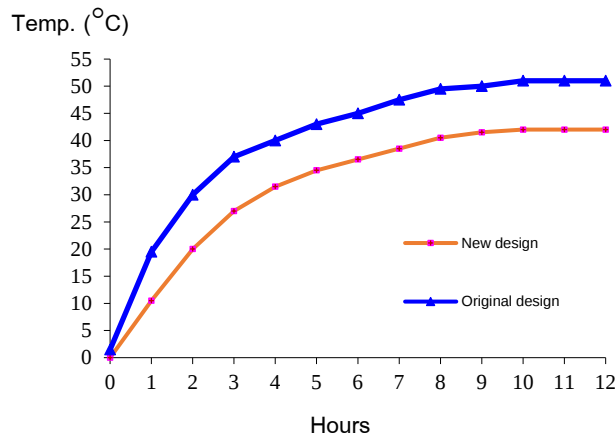
ตารางที่ 4 พารามิเตอร์จากการออกแบบที่ใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ของการทดสอบการทนการลัดวงจรของหม้อแปลง

พารามิเตอร์	ด้านแรงดันสูง		ด้านแรงดันต่ำ	
	แบบเดิม	แบบใหม่	แบบเดิม	แบบใหม่
Reactance (%)	3.77	4.18	3.77	4.18
Resistance (%)	1.11	1.10	1.11	1.10
Per unit impedance	3.93	4.32	3.93	4.32
Resistance per phase at 75 deg. C (ohm/phase)	11.82	11.05	0.00146	0.00125
Winding height (mm) : Hw	425	365	465	385
Number of turn per limb : N	2700	2600	27	26
Current density of winding (A/mm ²) : J	2.38	2.52	2.61	2.48
Mean diameter of winding (mm) : Dm	285	162	207	212
Radial of winding 1 : a1	-	-	22	23
Radial of winding 2 : a2	31	30	-	-
Width of main duct (mm) : d	12	11.5	12	11.5

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณแรงและอุณหภูมิสุดท้ายของการทดสอบการทนการลัดวงจร

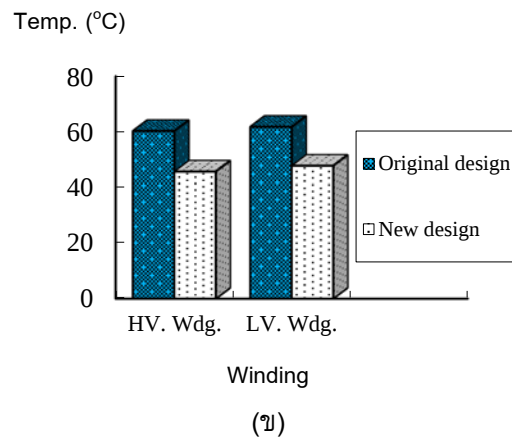
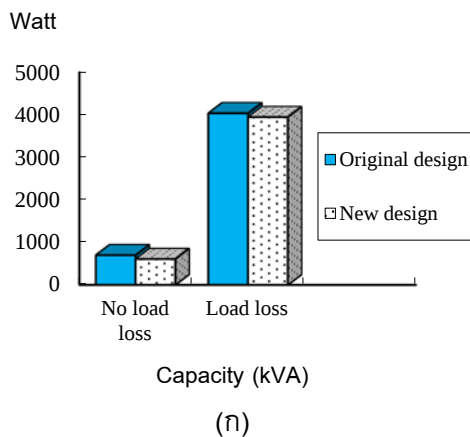
พารามิเตอร์	ด้านแรงดันสูง		ด้านแรงดันต่ำ	
	แบบเดิม	แบบใหม่	แบบเดิม	แบบใหม่
Asymmetrical short circuit current (A)	304.57	285.20	29015.09	27169.38
σ_{mean}	34.53	34.40	23.77	22.32
Radial force	1491.49	1351.47	892.06	848.97
Axial force	99.45	98.80	62.69	59.26
Final winding temperature (°C)	155.55	151.65	166.73	150.09

การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนของการออกแบบใหม่นำมาผลการออกแบบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการออกแบบแบบเดิมตามที่มาตรฐานกำหนด แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนระหว่างการออกแบบแบบเดิมกับการออกแบบใหม่ที่เกิดโหลด

การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียและอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดระหว่างการออกแบบแบบเดิมกับการออกแบบใหม่ที่เกิดโหลด แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 (ก) การเปรียบเทียบค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลดและขณะมีโหลดระหว่างการออกแบบแบบเดิมกับการออกแบบใหม่ที่เกิดโหลด (ข) การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของขดลวดแรงดันสูงและแรงดันต่ำระหว่างการออกแบบแบบเดิมกับการออกแบบใหม่ที่เกิดโหลด

4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากตารางที่ 5 จะทำให้ทราบว่าอุณหภูมิสุดท้ายของขดลวดหลังจากเกิดการลัดวงจรสูงมากกว่า 105 องศาเซลเซียส ซึ่งตามมาตรฐานฉนวนของหม้อแปลงจะมีระดับชั้นอุณหภูมิไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส ดังนั้นขณะหม้อแปลงเกิดการลัดวงจรจะทำให้ฉนวนและส่วนประกอบอื่นๆ เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ถ้าหากผู้ออกแบบสามารถทำการออกแบบหม้อแปลงโดยลดอุณหภูมิตรงส่วนนี้ลงได้ก็จะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพน้อยลงและทำให้หม้อแปลงมีอายุการใช้งานนานมากยิ่งขึ้น

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำหม้อแปลงที่ได้ออกแบบแล้วนำมาสร้างหม้อแปลงต้นแบบขึ้น แล้วนำเสนอวิธีการทดสอบ ค่าฉนวนและวิเคราะห์ผลอุณหภูมิของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดที่พิกัดและขณะลัดวงจรเพื่อหาค่าอุณหภูมิของขดลวดและพารามิเตอร์ขณะหม้อแปลงเกิดการลัดวงจร โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบ แบบเดิมกับแบบใหม่ที่น่าเสนอ จะเห็นว่าผลจากการออกแบบใหม่ มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน IEC และมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถใช้งานและทนกระแสลัดวงจรได้ตามที่มาตรฐานกำหนด โดยผลของการวิเคราะห์ตามตัวอย่างข้างต้นจะเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์ออกแบบ และตัดสินใจเลือกพารามิเตอร์และวัตถุดิบที่ใช้ในการออกแบบหม้อแปลง เช่น ขนาดของลวดตัวนำ ความหนาของฉนวน ชนิดและความหนาของเหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กของหม้อแปลงเพราะปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมานี้ มีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดการลัดวงจรของหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลอ้างอิงสำหรับใช้เป็นแนวทางในการใช้งาน และทำการวิเคราะห์ออกแบบหม้อแปลงให้สามารถทนต่อสภาวะลัดวงจรตามที่มาตรฐานกำหนด และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้ดียิ่งขึ้น

พารามิเตอร์ที่ได้จากบทความวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของหม้อแปลงขนาด 400 kVA 3 เฟส 50 Hz 22000-400/230 V Dyn 11 ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนั้นถ้าหากเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน อาจมีพารามิเตอร์บางอย่างแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยแต่ก็สามารถนำแนวทางจากงานวิจัยนี้ไปศึกษาและพัฒนาต่อไป สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของการออกแบบหม้อแปลงรวมถึงการเลือกใช้วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตหม้อแปลงที่มีกำลังไฟฟ้าขนาดต่างๆ ตามแนวทางของงานวิจัยนี้ก็จะทำให้มีข้อมูลอ้างอิงจำนวนมากขึ้น ทำให้ผู้ออกแบบสามารถออกแบบหม้อแปลงให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น มีอายุการใช้งานยาวนานยิ่งขึ้น และยังสามารถทำการวิเคราะห์ในเรื่องของอายุฉนวนของหม้อแปลงได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัทพงษ์พิมานการไฟฟ้า จำกัด และบริษัท ที.ดี.ทรานสฟอร์เมอร์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

References

- [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. (in Thai)
- [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] ANSI/IEEE C57.12.00. American national standard IEEE standard general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers; 2010.
- [5] Geno PP. Calculations for short circuit withstand capability of a distribution transformer. International Journal of Advancements in Technology 2011;2(1):142-50.
- [6] IEC 60076-5. Power transformer part 5: ability to withstand short circuit; 2006.
- [7] Suechoey B, Tangsrianukul W, Leelajindakrairerk M, Chompooinwai C. Novel techniques for improving short circuit withstand capability of distribution transformer considering short circuit force and winding temperature. Proceedings of the 21th ICEE International Conference on Electrical Engineering; 2015 July 5-9; The University of Hong Kong, Hong Kong. Hong Kong; 2015. p. 1-4.
- [8] Suechoey B, Chotiwanaporn N, Jayasak P, and Chompooinwai C. Proposition of individual guide for distribution transformer design to withstand short circuit condition. Proceedings of the 20th ICEE International Conference on Electrical Engineering; 2014 June 15-19; Jeju, Korea. Korea; 2014. p. 1-6.
- [9] IEC 354. Loading guide for oil-immersed power transformer; 2006.
- [10] Bharat Heavy Electrical Ltd. Transformer. 2nd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd; 2003.

ประวัติผู้เขียนบทความ



รศ.ดร.บุญเลิศ สื่อเฉย ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์ ทำงานวิจัยด้าน Machine Design, Power
System, Renewable Energy

Article History:

Received: November 26, 2018

Revised: April 17, 2019

Accepted: April 20, 2019