

การวิเคราะห์กำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 3 เฟส ในสภาวะโหลดปกติ และโหลดเกิน โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม

POWER LOSSES ANALYSIS IN 3 PHASE DISTRIBUTION TRANSFORMER IN NORMAL LOAD AND OVER LOAD CONDITION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TECHNIQUE

บุญเลิศ สือเฉย, สมศักดิ์ สิริโปรานานนท์*

Boonlert Suechoey, Somsak Siriporananon*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

Department of Electrical Engineering, Graduate Study, Faculty of Engineering, Southeast Asia University.

*Corresponding author, e-mail: somsaks@sau.ac.th

Received: 1 February 2022; Revised: 27 June 2022; Accepted: 31 August 2022

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอวิเคราะห์กำลังสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส ขนาด 100 kVA 22 kV-230/400 V ในสภาวะโหลดปกติ และโหลดเกิน โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งสามารถวิเคราะห์กำลังสูญเสียในหม้อแปลงได้เร็วกว่า และใช้ตัวแปรที่น้อยกว่าการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้มาจากการทดสอบที่โรงงานผู้ผลิตหม้อแปลง กระแสที่ทดสอบตั้งแต่ 1% - 140% ที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C แล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง มีจำนวน 70,000 ชุด โดยแยกสำหรับเป็นข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวน 56,000 ชุด และเป็นข้อมูลอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวน 14,000 ชุด จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมกับค่าที่คำนวณจากการทดสอบที่โรงงานผู้ผลิต ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไม่เกิน 1.06 อยู่ในระดับที่น่าพอใจ และสามารถนำวิธีการดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบทดสอบค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลงได้ในอนาคต

คำสำคัญ: หม้อแปลงจำหน่าย; กำลังสูญเสียในหม้อแปลง; โครงข่ายประสาทเทียม; อุณหภูมิ

Abstract

This research paper presents power loss analysis in a 3-phase distribution transformer of 100 kVA 22 kV-230/400 V in normal load and overload conditions using a neural network technique. This method can analyze power loss in the transformer quicker and use fewer variables than the power

loss calculation using various parameters obtained from transformer manufacturers. Seventy thousand sets of current tests ranging from 1% - 140% at temperatures of 35°C, 45°C, 55°C, 65°C and 75°C were experimentally measured, then power losses are calculated. Fifty-six thousand sets of those were used for training of the neural network to find the parameters and the other 14,000 sets were used for the input data to find power losses. In addition, the power losses obtained from the artificial neural network were compared with calculated power losses by using parameters from transformer manufacturers. The error percentage value no more than 1.06 was at a satisfactory level suggesting that this method can be applied in the designing of electrical power loss test for transformers in the future.

Keywords: Distribution Transformer; Power Losses; Artificial Neural Network; Temperature

บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจำหน่ายเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากสำหรับการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า การออกแบบ และการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า ต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดของการไฟฟ้า ในการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีความสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลงเรียกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power losses) ซึ่งประกอบด้วยการสูญเสียจากแกนเหล็ก (Core losses) และการสูญเสียจากขดลวดทองแดง (Copper losses) [1] ซึ่งประกอบด้วยหลาย ๆ ตัวแปร เช่น แรงดัน, กระแส, ความต้านทาน, อุณหภูมิ, ภาวะทางไฟฟ้า และคุณภาพของขดลวด ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลง มีความยุ่งยากและซับซ้อน อีกทั้งต้องหาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าและอุณหภูมิต่าง ๆ จาก [1] นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการระบุค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1 เฟส ขนาด 75 kVA โดยการป้อนตัวแปร 6 ตัวแปร ที่อุณหภูมิ 30°C, 35°C และ 40°C เข้าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ทำให้สามารถลดความยุ่งยากและซับซ้อนลง และ [2] นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการระบุค่าความสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลง 1 เฟส 30 kVA โดยการป้อนตัวแปร 3 ตัวแปร ที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C และ 55°C เข้าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ทำให้สามารถลดความยุ่งยากและซับซ้อนได้ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 1.2% และ [3] นำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียมค้นหาการประมาณค่าที่ดีที่สุดในการหาค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า คือโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Feed-forward multilayer perceptron. MLP)

ในบทความวิจัยนี้ นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมด้วยการป้อนอินพุต 5 ตัวแปร ที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C ในการหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส โดยทำการศึกษามหาหม้อแปลงที่พิกัด 100 kVA 22 kV-230/400 V ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Feed-forward multilayer perceptron. MLP) [3] ซึ่งสามารถลดความจำนวนตัวแปรได้น้อยกว่า [1] และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่น้อยกว่า [2] ผลจากงานวิจัยสามารถช่วยวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในสภาวะโหลดปกติ และโหลดเกินได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น และสามารถช่วยในการวางแผนการใช้งานหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการและวิธีการวัดหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส โดยทำการศึกษาที่พิกัด 100 kVA 22 kV-230/400 V ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

2. นำเสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมด้วยการป้อนอินพุต 5 ตัวแปร ที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C ในการหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส

3. นำผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ ช่วยวิเคราะห์ค่าความสูญเสียในสภาวะโหลดปกติ และโหลดเกินจากการไปใช้งานจริง และสามารถช่วยในการวางแผนการใช้งานหม้อแปลงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

หลักการที่เกี่ยวข้อง

กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง (Power Losses)

ค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง เป็นค่ากำลังสูญเสียรวมในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก(Core losses) และค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง(Copper losses) ดังสมการที่ 1 [1, 2, 4]

$$P_T = P_{Core} + P_{CU} \quad (1)$$

โดยที่ P_T คือ กำลังสูญเสียรวมในตัวหม้อแปลง (W), P_{Core} คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (W), P_{CU} คือ กำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง (W)

กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses)

การทดสอบเปิดวงจร ดังภาพที่ 1 (ก) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก ค่าสูญเสียในแกนเหล็กมีผลเนื่องจากความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy-current loss) และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กจะมีค่าคงที่ในทุก ๆ สภาวะของภาวะทางไฟฟ้า ดังสมการที่ 2 [1-2]

$$P_{Core} = P_H + P_E \quad (2)$$

โดยที่ P_{Core} คือ ความสูญเสียในแกนเหล็ก (W), P_H คือ ความสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (W), P_E คือ ความสูญเสียจากกระแสไหลวน (W)

-ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) ดังสมการที่ 3 [5]

$$P_H = K_S \cdot B^{1.6} \cdot f \quad (3)$$

โดยที่ K_S คือ สัมประสิทธิ์ของวัสดุที่ผสมในแกนเหล็ก, B คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (T), f คือ ความถี่ (Hz)

-ความสูญเสียจากกระแสไหลวน (eddy-current loss) ดังสมการที่ 4 [5]

$$P_E = K_e \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

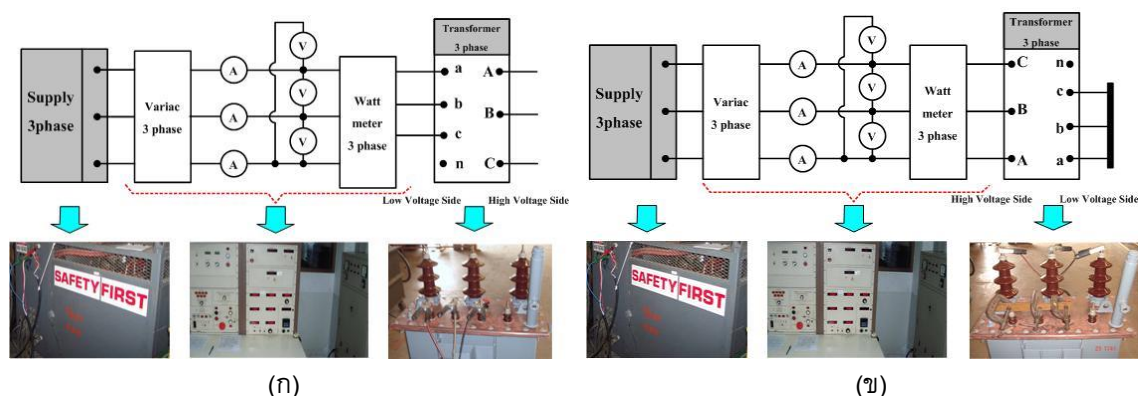
โดยที่ K_e คือ ค่าคงที่กระแสไหลวน, d คือ ความหนาของแกนเหล็กลามิเนต (mm), B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (T) และ f คือ ความถี่ (Hz)

การสูญเสียจากขดลวดทองแดง (Copper losses)

การทดสอบลัดวงจร ดังภาพที่ 1 (ข) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดงโดยลัดวงจรทางด้านแรงต่ำ (low voltage side) และจ่ายแรงดันทางด้านแรงสูง (high voltage side) ให้ได้ตามพิกัดกระแสด้านแรงสูงหาได้ดังสมการที่ 5 [5,6]

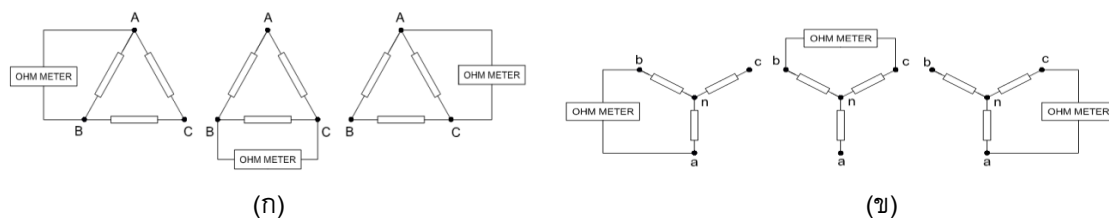
$$P_{CU} = 3(I_{HV}^2 \cdot R_{HV} + I_{LV}^2 \cdot R_{LV}) \quad (5)$$

โดยที่ R_{HV} คือความต้านทานขดลวดแรงสูง, I_{HV} คือ กระแสทางด้านขดลวดแรงสูง, R_{LV} คือ ความต้านทานขดลวดแรงต่ำ และ I_{LV} คือ กระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ



ภาพที่ 1 (ก) การทดสอบเปิดวงจร (ข) การทดสอบลัดวงจร

การวัดความต้านทานของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดความต้านทาน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การวัดค่าความต้านทานที่ขั้วของหม้อแปลง (ก) ทางด้านแรงดันสูง (ข) ทางด้านแรงดันต่ำ

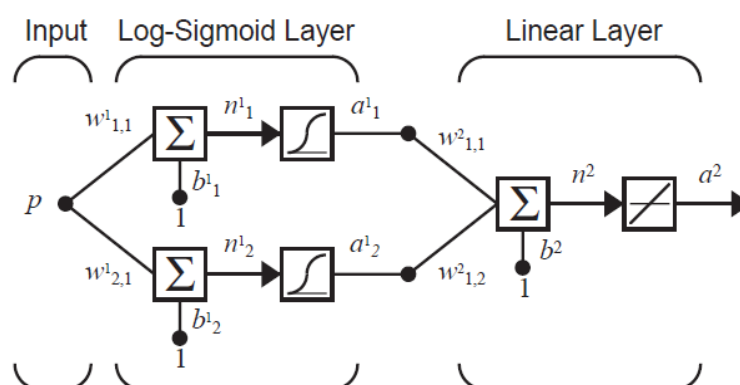
การหาค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดทองแดง เพื่อประกอบกับการพิจารณาอุณหภูมิของขดลวดอันเนื่องมาจากความร้อนสะสมที่เพิ่มขึ้นของหม้อแปลง ค่าความต้านทานที่วัดได้เป็นไปตามอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งสามารถหาค่าความต้านทานตามอุณหภูมิที่ต้องการได้ ดังสมการที่ 6 [7-9]

$$R_r = R_a \left(\frac{235 + \theta_r}{235 + \theta_a} \right) \quad (6)$$

โดยที่ R_r คือ ความต้านทานขดลวดที่อุณหภูมิต้องการ (θ_r), R_a คือ ความต้านทานขดลวดที่อุณหภูมิแวดล้อม (θ_a)

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks)

จากการศึกษานำโครงข่ายประสาทเทียม [3,5,10-13] มาหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น(Feed-forward multilayer perceptron. MLP) เหมาะกับการนำมาใช้หาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า [10]

การประยุกต์ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียม

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง ได้แก่ อุณหภูมิ(T), กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก(P_{Core}), กำลังสูญเสียในขดลวด(P_{Cu}), ความต้านทานขดลวดด้านแรงดันสูง(R_{HV}), ความต้านทานขดลวดด้านแรงดันต่ำ(R_{LV}), กระแสทางด้านขดลวดแรงสูง(I_{HV}), กระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ(I_{LV}) และกระแสทดสอบ(I_{Test})

จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ค่าพารามิเตอร์หลักได้แก่ อุณหภูมิ(T), กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก(P_{Core}), และกระแสทดสอบ(I_{Test}) และค่าพารามิเตอร์รองได้แก่ กำลังสูญเสียในขดลวด(P_{Cu}), ความต้านทานขดลวดด้านแรงดันสูง(R_{HV}), ความต้านทานขดลวดด้านแรงดันต่ำ(R_{LV}), กระแสทางด้านขดลวดแรงสูง(I_{HV}) และกระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ(I_{LV})

จากสมการที่ 5 ค่ากำลังสูญเสียในขดลวด(P_{Cu}) ขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดและความต้านทานของขดลวด สำหรับกระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ(I_{LV}) มีผลต่อกำลังสูญเสียในขดลวดมากที่สุด เนื่องจากมีค่ากระแสสูงกว่ากระแสทางด้านขดลวดแรงสูง(I_{HV}) มาก และผลการทดสอบเปรียบเทียบการป้อนข้อมูลอินพุตระหว่างกระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ(I_{LV}) กับกระแสทางด้านขดลวดแรงสูง(I_{HV}) การป้อนกระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ(I_{LV}) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดต่ำกว่ากระแสทางด้านขดลวดแรงสูง(I_{HV})

จากงานของ Souza et al.[1] ในการหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า ใช้ 6 ตัวแปรประกอบด้วย อุณหภูมิ(T), ความต้านทานขดลวดด้านแรงดันสูงและแรงดันต่ำ(R_{HV} และ R_{LV}), กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก(P_{Core}), กำลังสูญเสียของขดลวดทองแดง(P_{Cu}) และกระแสทดสอบ(I_{Test})

งานวิจัยนี้จะใช้อินพุต 5 ตัวแปรประกอบด้วยอุณหภูมิ(T), ความต้านทานขดลวดด้านแรงดันต่ำ(R_{LV}), กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก(P_{Core}), กระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ(I_{LV}), และกระแสทดสอบ(I_{Test}) เป็นข้อมูลป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียม

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้มาจากการทดสอบหม้อแปลงที่บริษัทผู้ผลิต จำนวน 100 เครื่อง ใช้กระแสที่ทดสอบตั้งแต่ 1% - 140% นำมาคำนวณที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C แล้วนำมาคำนวณหาค่า

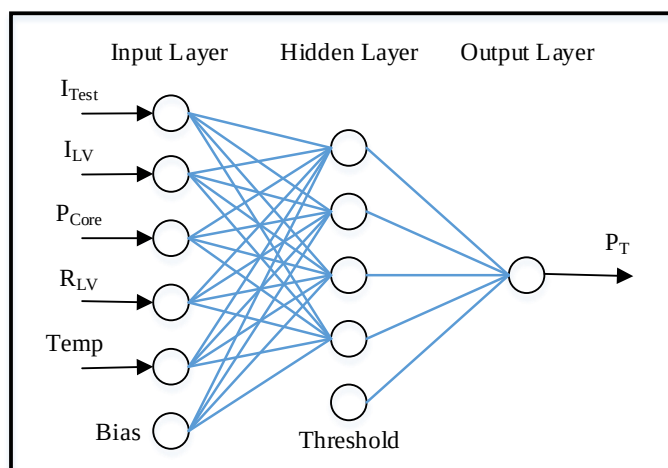
กำลังสูญเสียในหม้อแปลง สามารถแยกข้อมูลออกได้จำนวน 70,000 ชุด โดยแบ่งสำหรับเป็นข้อมูลที่ใช้ในฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวน 80 เครื่อง (56,000 ชุด) ดังตารางที่ 1 และเป็นข้อมูลอินพุตของโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงของโครงข่ายประสาทเทียม จำนวน 20 เครื่อง (14,000 ชุด) จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากการวัดในโรงงาน เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

No	I_{Test} (%)	I_{LV} (A)	P_{CORE} (W)	R_{LV} ($m\Omega$)	Temp ($^{\circ}C$)	P_T (W)
1	1	1.44	240.2	10.70	35	240.3
2	2	2.89	240.2	10.70	35	240.7
3	3	4.33	240.2	10.70	35	241.3
4	4	5.77	240.2	10.70	35	242.2
5	5	7.22	240.2	10.70	35	243.4
6	6	8.66	240.2	10.70	35	244.8
7	7	10.10	240.2	10.70	35	246.5
8	8	11.55	240.2	10.70	35	248.4
9	9	12.99	240.2	10.70	35	250.5
10	10	14.43	240.2	10.70	35	253.0
⋮						
11190	130	187.64	240.2	10.75	35	2393.2
11191	131	189.08	240.2	10.75	35	2426.5
11192	132	190.53	240.2	10.75	35	2460.0
11193	133	191.97	240.2	10.75	35	2493.7
11194	134	193.41	240.2	10.75	35	2527.8
11195	135	194.86	240.2	10.75	35	2562.0
11196	136	196.30	240.2	10.75	35	2596.6
11197	137	197.74	240.2	10.75	35	2631.3
11198	138	199.19	240.2	10.75	35	2666.4
11199	139	200.63	240.2	10.75	35	2701.7
11200	140	202.07	240.2	10.75	35	2737.2
11201	1	1.44	240.2	11.09	45	240.3
11202	2	2.89	240.2	11.09	45	240.7
11203	3	4.33	240.2	11.09	45	241.4
11204	4	5.77	240.2	11.09	45	242.3
11205	5	7.22	240.2	11.09	45	243.5
11206	6	8.66	240.2	11.09	45	245.0
11207	7	10.10	240.2	11.09	45	246.7

11208	8	11.55	240.2	11.09	45	248.7
11209	9	12.99	240.2	11.09	45	250.9
11210	10	14.43	240.2	11.09	45	253.4
⋮						
55991	131	189.08	240.2	12.34	75	2750.4
55992	132	190.53	240.2	12.34	75	2788.8
55993	133	191.97	240.2	12.34	75	2827.6
55994	134	193.41	240.2	12.34	75	2866.7
55995	135	194.86	240.2	12.34	75	2906.0
55996	136	196.30	240.2	12.34	75	2945.6
55997	137	197.74	240.2	12.34	75	2985.6
55998	138	199.19	240.2	12.34	75	3025.8
55999	139	200.63	240.2	12.34	75	3066.3
56000	140	202.07	240.2	12.34	75	3107.1

จากตารางที่ 1 เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการทดสอบหม้อแปลงที่บริษัทผู้ผลิต นำมาทำการฝึกสอนทำให้ได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม อินพุต 5 โหนด ชั้นซ่อน (Hidden layer) 4 โหนด ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นลอจิสติกมอยด์ (Log-sigmoid) และชั้นเอาต์พุต (Output layer) 1 โหนด ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นลิเนียร์ฟังก์ชัน (Linear) แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม แบบอินพุต 5 ตัวแปร

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม แบบอินพุต 5 ตัวแปร แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การปรับปรุงโครงข่ายประสาทเทียม (Improved Neural Network)

Hidden 1			
Node 1 (Sigmoid)	Node 2 (Sigmoid)	Node 3 (Sigmoid)	Node 4 (Sigmoid)
I_{Test} (%): -1.008	I_{Test} (%): -1.398	I_{Test} (%): 1.279	I_{Test} (%): -0.988
I_{LV} (A): -0.963	I_{LV} (A): -1.410	I_{LV} (A): 1.251	I_{LV} (A): -1.020
P_{CORE} (W): 0.009	P_{CORE} (W): -0.002	P_{CORE} (W): -0.003	P_{CORE} (W): -0.005
R_{LV} (m Ω): -0.014	R_{LV} (m Ω): -0.109	R_{LV} (m Ω): 0.079	R_{LV} (m Ω): -0.000
Temp: -0.018	Temp: -0.137	Temp: 0.087	Temp: 0.001
Bias: -3.382	Bias: 4.152	Bias: -1.580	Bias: -0.281
Output			
Regression (Linear)			
Node 1: 0.895			
Node 2: -2.469			
Node 3: 1.102			
Node 4: -0.977			
Threshold: 2.104			

ผลการวิจัย

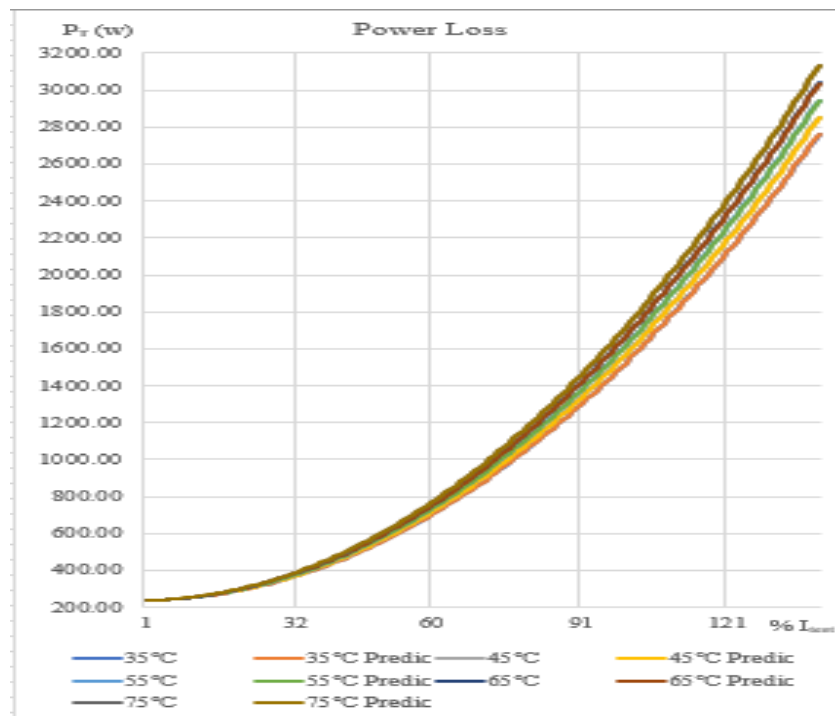
ข้อมูลจากการทดสอบจริงที่วัดจากหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟสขนาด 100 kVA 22 kV-230/400 V แล้วนำไปผ่านการฝึกสอน จะเป็นแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และทำการประเมินแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่วัดจริงเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด จากการเปรียบเทียบข้อมูลจำนวน 20 เครื่อง (14,000 ชุด) ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง

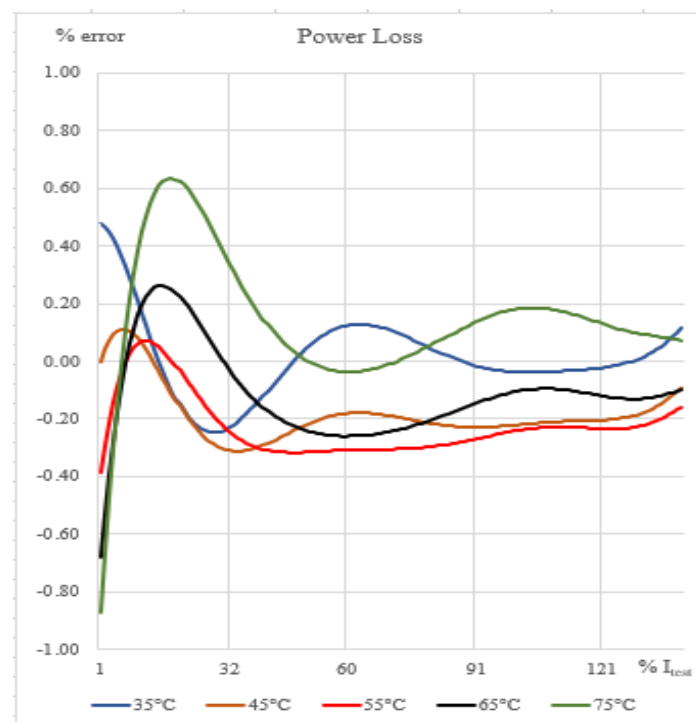
No.	I_{Test} (%)	P_T (W)	Prediction (P_T)	% error	Temp (°C)
1	1	238.93	240.06	0.47	35
2	2	239.31	240.43	0.46	35
3	3	239.96	241.03	0.45	35
4	4	240.86	241.88	0.42	35
5	5	242.02	242.98	0.40	35
6	6	243.43	244.32	0.36	35
7	7	245.10	245.91	0.33	35
8	8	247.03	247.75	0.29	35
9	9	249.22	249.84	0.25	35
10	10	251.66	252.19	0.21	35

⋮					
2790	130	2396.72	2396.44	-0.01	35
2791	131	2430.02	2429.93	0.00	35
2792	132	2463.59	2463.69	0.00	35
2793	133	2497.41	2497.75	0.01	35
2794	134	2531.48	2532.08	0.02	35
2795	135	2565.81	2566.70	0.03	35
2796	136	2600.39	2601.61	0.05	35
2797	137	2635.23	2636.82	0.06	35
2798	138	2670.33	2672.31	0.07	35
2799	139	2705.68	2708.11	0.09	35
2800	140	2741.28	2744.20	0.11	35
2801	1	238.93	238.93	0.00	45
2802	2	239.33	239.43	0.04	45
2803	3	240.00	240.17	0.07	45
2804	4	240.93	241.15	0.09	45
2805	5	242.13	242.39	0.11	45
2806	6	243.60	243.87	0.11	45
2807	7	245.33	245.61	0.11	45
2808	8	247.34	247.60	0.11	45
2809	9	249.60	249.84	0.09	45
2810	10	252.14	252.34	0.08	45
⋮					
13991	131	2754.47	2753.29	-0.04	75
13992	132	2793.01	2791.80	-0.04	75
13993	133	2831.84	2830.61	-0.04	75
13994	134	2870.96	2869.71	-0.04	75
13995	135	2910.37	2909.12	-0.04	75
13996	136	2950.08	2948.83	-0.04	75
13997	137	2990.08	2988.83	-0.04	75
13998	138	3030.37	3029.12	-0.04	75
13999	139	3070.96	3069.70	-0.04	75
14000	140	3111.84	3110.56	-0.04	75

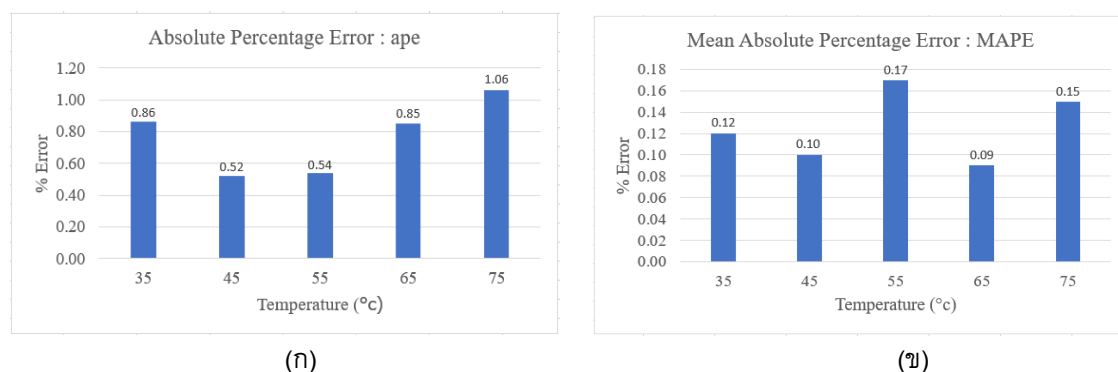
จากตารางที่ 3 สามารถแสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดได้จริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังภาพที่ 5 และสามารถแสดงตัวอย่างเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแต่ละอุณหภูมิ ดังภาพที่ 6 ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดทั้งบวกและลบ เนื่องจากค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดได้จริงมีค่ามากน้อยสลับกัน



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการจำลองกับค่าที่วัดได้จริง ที่อุณหภูมิที่ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C



ภาพที่ 6 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่อุณหภูมิที่ 35°C, 45°C, 55°C, 65°C และ 75°C



ภาพที่ 7 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์กับค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์กับค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute Percentage Error : APE) กับค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) และสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) กับค่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 7 (ข)

การคำนวณค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส ต้องใช้ตัวแปรในการคำนวณ 6 ตัวแปร แต่ในการวิจัยเป็นการนำเสนอเทคนิคที่ช่วยในการหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลงจำหน่าย 3 เฟส ขนาด 100 kVA 22 KV-230/400 V โดยตัวแปรในการคำนวณเพียง 5 ตัวแปร และใช้โครงข่ายประสาทเทียม ทำหน้าที่เป็นตัวคาดการณ์ (Prediction) และจากการทดสอบข้อมูลที่ได้จากการวัดจริง 14,000 ชุด ทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดสัมบูรณ์ (Absolute Percentage Error : APE) ไม่เกิน 1.06 และค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Percentage Error : MAPE) ไม่เกิน 0.17 ซึ่งอยู่ในช่วงที่น่าพอใจ

ผลที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ ลดขั้นตอนการคำนวณ และยังช่วยประเมินการจ่ายโหลดในสถานะต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การประหยัดพลังงาน และผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพที่ดี มีความถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริง และสามารถพัฒนาต่อไปในอนาคตได้ โดยมีข้อจำกัดสามารถใช้ในการทำนายค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม (P_T) ของหม้อแปลงจำหน่าย ไม่เกิน 2,000 kVA ตามมาตรฐานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)

เอกสารอ้างอิง

- [1] De souza, A. N., Da Silva, L. N., de Soura, C. F. L. N., and Zago, M. G. (2001). *Using Artificial Neural Networks for Identification of Electrical Losses in Transformers during the Manufacturing Phase*. In Proceedings the 2002 International Joint Conference on Neural Network. V.2. pp. 1346-1350. Hong Kong.
- [2] Suttisinthong, N., and Pothisarn, C. (2014). *Analysis of Electrical Losses in Transformers using Artificial Neural Networks*. In Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. pp. 1-5. Hong kong.
- [3] Basheer, I. A., and Hajmeer, M. (2000). Artificial neural networks, fundamentals, computing, design, and application. *Journal of Microbiological Methods*, 43(1), 3-31.

- [4] Suechoey, B., Siriporananon, S., Pringsakul, N., and Thongrak, A. (2018). *Implementation of Load Cycle Simulation for Studies of Loss Energy and Lifetime of Oil-Immersed Transformers*. In Proceedings of the 10th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018). pp. 202-207.
- [5] Siriporananon, S., and Suechoey, B. (2020). Power Losses Analysis in a Three-Phase Distribution Transformer Using Artificial Neural Networks. *The ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics & Communications*, 18(2), 130-136.
- [6] Siriporananon, S., Suechoey, B., and Pringsakul, N. (2018). *Performance testing of transformers used in distribution systems*. In Proceedings of the 10th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018). pp. 196-201.
- [7] IEC 60076-2. (2006). Power Transformer Part 2 : Temperature Rise.
- [8] Grainger, J. J., and Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill International editions.
- [9] Provincial Electricity Authority Thailand (PEA). (2015). *Three-Phase Transformer for 22 kV and 33 kV Distribution Systems with Ability to Withstand Short Circuit*. Specification No. RTRN-035/2558.
- [10] Hagan, M. T., Demuth, H. B., and Beale, M. (1996). *Neural Network Design*. Boston. USA, PWS Publishing Company.
- [11] Demuth, H., and Beale, M. (1998). *Neural Network Toolbox User's Guide*. The Mathwork Inc.
- [12] Souza, K. N., Castro, T. N., Pereira, T. M., Pontes, R. S. T., and Braga, A. P. S. (2011). *Prediction of core losses on a three-phase transformer using neural network*. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1105-1108.
- [13] Yadav, A. K., Azeem, A., Singh, A., Malik, H., and Rahi, O. P. (2011). *Application Research Based on Artificial Neural Network (ANN) to Predict No-Load for Transformer's Design*. International Conference on Communication Systems and Network Technologies. pp. 180-183.