

ผลกระทบความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่อก๊าซผิดพร่องในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

Effect of Total Harmonic Distortion to Fault Gases in Distribution Transformer Oil

อิทธิพล อินทมาตย์ สำเร็จ อินทามั้ย ภรชัย จุณวัจนกุล และ วันชัย จันไกรผล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสต่อปริมาณก๊าซผิดพร่องที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอย โดยทำการตรวจวัดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสโพลของหม้อแปลงไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าไปทำการทดสอบหาปริมาณก๊าซผิดพร่องที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า พบว่าค่าความสอดคล้อง, R^2 ระหว่างค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสโพลกับปริมาณก๊าซผิดพร่องที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า มีค่าประมาณ 0.598-0.795 และค่าความสัมพันธ์ของทั้งสอง, R จะมีค่าประมาณ 0.773-0.892 ซึ่งถือว่าค่าความสอดคล้อง, R^2 และค่าความสัมพันธ์ของทั้งสอง, R มีค่าเบี่ยงทางเข้าใกล้ 1.0 ซึ่งถือว่ามีความสัมพันธ์กันโดยตรง ดังนั้นการตรวจสอบสภาพทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้า จากการทดสอบหาปริมาณก๊าซผิดพร่องที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ถือว่าเป็นวิธีการพื้นฐานที่ดีและสามารถบอกให้ทราบถึงความผิดปกติที่จะเริ่มก่อตัวขึ้นภายในหม้อแปลงได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องวิธีหนึ่ง

คำสำคัญ : ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ก๊าซผิดพร่องที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

Abstract

This paper presents the effect of total harmonic distortion to fault gases in distribution transformer oil by regression analysis. This research measured the total harmonic distortion of voltage (THDv) and current (THDi) of transformer load using power quality meter and take a sample of transformer oil for the fault gases analysis. From the regression analysis results found that a determination coefficient of total harmonic distortion of current (THDi) and fault gases in transformer oil have a value in range of 0.598-0.795 and a correlation coefficient in range of 0.773-0.892 which these parameters have a value nearly of 1.0 that a good direct relationship. Finally, fault gas analysis gives a good basis for a monitoring system as it can give a general picture of transformer health and an incipient fault rapidly and accuracy.

Keywords : Total Harmonic Distortion, Fault Gases, Regression Analysis,

1. บทนำ

การประเมินอายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถพิจารณาจากสภาพฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ได้รับค่านิยมและให้การยอมรับ คือ การวิเคราะห์ก๊าซผิดพร่องที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (fault gases analysis) ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าได้ว่าหม้อแปลงมีสภาพการใช้งานเป็นอย่างไร ซึ่งจะเป็นข้อมูลในการวางแผนการใช้งานและบำรุงรักษาต่อไป [1-3] สาเหตุที่ทำให้หม้อแปลงมีการเสื่อมสภาพ มีหลายปัจจัย [4-5] เช่น ปัจจัยเนื่องจากตัวฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าเอง ปัจจัยในระหว่างกระบวนการผลิตหม้อแปลง และปัจจัยที่เกิดจากการใช้งาน เช่น การใช้งานกับโหลดที่เป็นโหลดไม่เชิงเส้นเป็นจำนวนมาก ในกรณีที่มีการใช้กับโหลดที่เป็นโหลดแบบไม่เชิงเส้นทำให้เกิดฮาร์มอนิก ซึ่งทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดมากกว่าปกติ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้าและฉนวนก็ได้รับผลกระทบดังกล่าวทำให้เสื่อมสภาพเร็วขึ้น

ดังนั้นในบทความนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสกับปริมาณก๊าซผิดพร่องที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง 5-6 โรงงาน โดยทำการตรวจวัดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสโพลของหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยเครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าไปทำการทดสอบหาปริมาณก๊าซผิดพร่องที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผลกระทบของความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่อหม้อแปลงไฟฟ้า [4]

กระแสฮาร์มอนิกในหม้อแปลงไฟฟ้า จะมาจากโหลดในภาคอุตสาหกรรม จะทำให้เกิดความสูญเสียในขดลวดทองแดงและปลั๊กคดค้างมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่องค์ประกอบแรงดันของฮาร์มอนิกจะมีผลต่อความสูญเสียในแกนเหล็ก จากผลของค่าความผิดเพี้ยนเหล่านี้ จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า และจะไปทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและลดอายุการใช้งานของฉนวนลง

ความสูญเสียรวมในหม้อแปลงไฟฟ้า, P_T สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือความสูญเสียขณะไร้โหลดและความสูญเสียขณะมีโหลด ความสูญเสียขณะไร้โหลด, P_{NL} มีสาเหตุมาจากการสูญเสียจากกระแสไหลวน และการสูญเสียจากฮีสเตอร์ซิส ส่วนการสูญเสียขณะมีโหลด, P_{LL} มีสาเหตุมาจากการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานขดลวด, (I^2R) และการสูญเสียจากสเตรย์ ทั้งหมด, (P_{TSL}) สามารถแสดงได้ตามสมการ

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} = P_{NL} + I^2R + P_{TSL} \quad (1)$$

หม้อแปลงไฟฟ้าขณะไร้โหลด จะได้รับกระแสฮาร์มอนิกที่แรงดันพิกัด จะทำให้เกิดกระแสแม่เหล็กตามทางเดินแกนเหล็กและเกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก การเพิ่มขึ้นของความสูญเสียในแกนเหล็กจะไม่นับสำคัญมากนัก ซึ่งความสูญเสียในแกนเหล็กนี้จะขึ้นอยู่กับ การออกแบบและการเลือกใช้วัสดุแกนเหล็ก ส่วนความสูญเสียขณะมีโหลดมีสาเหตุมาจากความเพี้ยนรวมของกระแสฮาร์มอนิกกับค่าความต้านทานขดลวดกระแสตรง ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด และความสูญเสียสเตรย์เนื่องจากการสูญเสียในแคลมป์การเชื่อมต่อ ฉนวนหม้อแปลงและส่วนอื่นๆของหม้อแปลง ความสูญเสียขณะมีโหลดสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} \quad (2)$$

เมื่อ

I^2R : ความสูญเสียเนื่องจากความต้านทานกระแสตรง, วัตต์

P_{EC} : ความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด, วัตต์

P_{OSL} : ความสูญเสียสเตรย์ในส่วนอื่นๆของหม้อแปลง, วัตต์

ความสูญเสียจากกระแสไหลวนในขดลวด สามารถหาได้จากสมการ

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 h^2 \quad (3)$$

เมื่อ

P_{EC} : ความสูญเสียจากกระแสไหลวน, วัตต์

P_{EC-R} : ความสูญเสียจากกระแสไหลวนที่พิกัด, วัตต์

I_h : ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความถี่ฮาร์มอนิกรวมของกระแสที่ลำดับ h

ส่วนความสูญเสียในส่วนอื่นๆของหม้อแปลง สามารถหาได้จากสมการ

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 h^{0.8} \quad (4)$$

เมื่อ

P_{OSL} : ความสูญเสียในส่วนอื่นๆของหม้อแปลง, วัตต์

P_{OSL-R} : ความสูญเสียในส่วนอื่นๆของหม้อแปลงที่พิกัด, วัตต์

I_h : ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความถี่ฮาร์มอนิกรวม

ของกระแสที่ลำดับ h

แฟกเตอร์ความสูญเสียฮาร์มอนิกสำหรับกระแสไหลวนในขดลวด หาได้จาก

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2} \quad (5)$$

แฟกเตอร์ความสูญเสียฮาร์มอนิกสำหรับความสูญเสียสเตรย์อื่นๆหาได้จาก

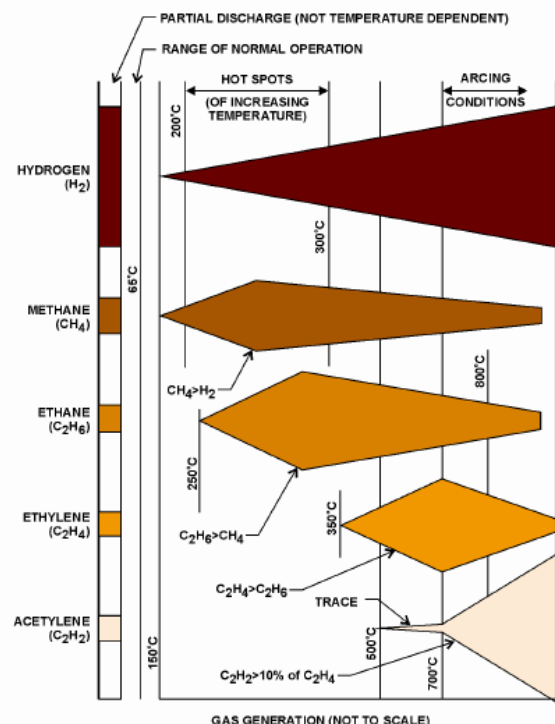
$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I} \right)^2} \quad (6)$$

ดังนั้นความสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีโหลด จะเป็นไปตามสมการ

$$P_{LL} = I^2R + F_{HL} P_{EC} + F_{HL-STR} P_{OSL} \quad (7)$$

2.2 การวิเคราะห์ก๊าซผิดปกติที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า (Fault Gases Analysis)[2-3],[6]

การวิเคราะห์ก๊าซผิดปกติที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยก๊าซเหล่านี้จะบ่งบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น เกิดการลัดวงจรของขดลวด การใช้โหลดเกินพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 1 การเกิดก๊าซที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ[6]

จากแผนภูมิของก๊าซต้องการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ชนิดของก๊าซ และปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้น จะเห็นว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150 °C ถึง 500 °C จะทำให้น้ำมันมีการแตกตัวและทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน(H₂) ก๊าซมีเทน(CH₄) และเกิดก๊าซอีเทน(C₂H₆) เป็นจำนวนมาก ส่วนก๊าซเอทิลีน(C₂H₄) จะมีการเกิดขึ้นอีกจำนวนหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันสูงขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวจะพบว่าก๊าซไฮโดรเจน(H₂) มากพอที่จะทำให้พบว่าก๊าซอีเทน(C₂H₆) มีค่ามากกว่าก๊าซมีเทน(CH₄) และก๊าซเอทิลีน(C₂H₄) มีค่ามากกว่าก๊าซอีเทน(C₂H₆) ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นก๊าซไฮโดรเจน(H₂) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นก็จะเกิดก๊าซเอทิลีน(C₂H₄) และก๊าซอะเซทิลีน(C₂H₂) แต่จะมีค่าขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับการเกิดก๊าซอื่น ซึ่งก๊าซอะเซทิลีนจะสามารถพบได้ชัดเจนขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 700 °C ขึ้นไป

โดยทั่วไปก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า[6]

ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ตรวจสอบพบ	ความหมาย
ก๊าซ N ₂ เพิ่มขึ้น 5% หรือน้อยกว่า O ₂	การใช้งานปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด seal type
ก๊าซ N ₂ มากกว่า 5% ของก๊าซ O ₂	ตรวจรอยรั่วของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด seal type
ก๊าซ N ₂ , CO ₂ , CO หรือทั้งหมด	การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเกินปกติหรือเกิดความร้อนในการทำงาน สาเหตุเนื่องจากเกิดเบรคความดันในกระดาดจนวน ให้ตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งาน
ก๊าซ N ₂ และ H ₂	เกิดดีสารขางบางส่วน, เกิดแยกน้ำเป็นออกซิเจนหรือเกิดสนิม
ก๊าซ N ₂ , H ₂ , CO ₂ และ CO	เกิดดีสารขางบางส่วนขึ้นภายในกระดาดจนวนหรือเกิดจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเกินโหลด
ก๊าซ N ₂ , H ₂ , CH ₄ และแก๊สปริมาณก๊าซ C ₂ H ₆ และ C ₂ H ₄ เล็กน้อย	สปาร์คหรือเกิดเบรคความดันภายในน้ำมันหม้อแปลง
ก๊าซ N ₂ ร่วมกับ H ₂ ปริมาณสูงและมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น C ₂ H ₂ เล็กน้อย	เกิดอาร์กชนิดที่มีพลังงานสูงมาก สาเหตุเนื่องจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันอย่างรวดเร็ว
ก๊าซ N ₂ ร่วมกับ H ₂ ปริมาณสูง, CH ₄ และ C ₂ H ₄ ในปริมาณสูงและมี C ₂ H ₂ เล็กน้อย	เกิดอาร์กในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงภายในบริเวณแคบๆ ตัวอย่างเช่น เกิดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด
มีปริมาณก๊าซเหมือนข้างบน แต่มี CO ₂ และ CO เกิดร่วมอยู่ด้วย	เกิดอาร์กในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงภายในบริเวณแคบๆ ของกระดาดจนวน

2.3 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ของสองตัวแปร ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ได้รับค่านิยมคือ การประมาณค่าวิธีกำลังสองน้อยสุด (least square approximation) โดยข้อมูลที่ได้อาจการทดลอง แล้วเก็บรวบรวมแล้วนำมาวาดเป็นกราฟจะได้จุดที่กระจายอยู่ การสร้างสมการกำลังสองน้อยสุด ก็จะมีวิธีการ 3 วิธีคือ วิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงเส้น วิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงพหุนาม และวิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงพหุคูณ ทั้งนี้ในการวิเคราะห์วิธีการใดจะพิจารณาว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูลนั้น มีวิธีการ 3 รูปแบบดังนี้

1. วิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงเส้น (linear least square method)

$$f(x) = a + bx \quad (8)$$

2. วิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงพหุนาม (polynomial least square method)

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (9)$$

3. วิธีกำลังสองน้อยสุดเชิงพหุคูณ (multiple linear least square method)

$$f(x) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (10)$$

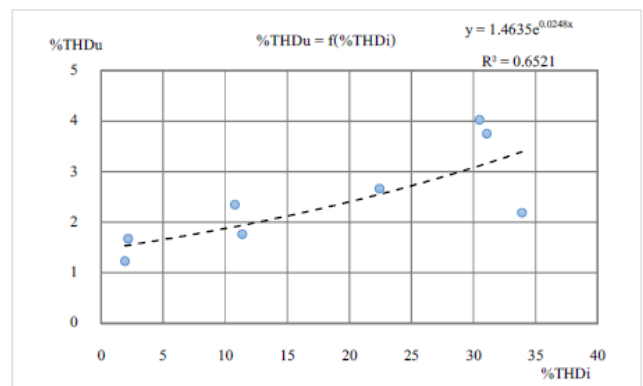
ในการพิจารณาว่า สมการทางคณิตศาสตร์ทั้งสามวิธีมีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลที่มีอยู่หรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้อง (coefficient of determination : R²) หากค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้องมีค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่าข้อมูลเหล่านั้นมีความเกี่ยวข้องกัน และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R) หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าใกล้ 1.0 ก็หมายความว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน โดยตรงเป็นอย่างมาก

3. การตรวจวัดและการทดสอบ

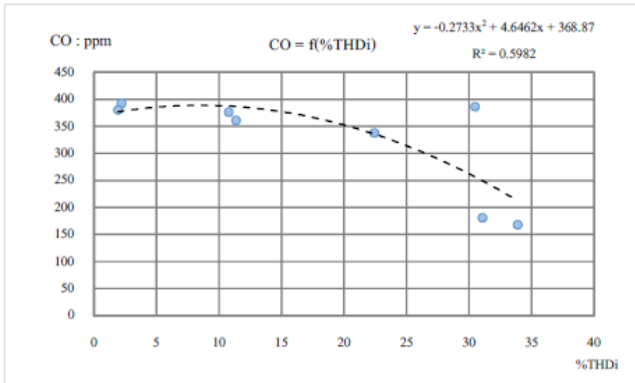
ในงานวิจัยได้ทำการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า ยี่ห้อ Chauvin Amoux C.A8332 ตรวจวัดความผิดปกติของฮาร์มอนิกแรงดันและกระแสของโหลดหม้อแปลงไฟฟ้า พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า นำมาทำการทดสอบหาปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าจากโรงงานอุตสาหกรรม 5 แห่งด้วยกัน หลังจากนั้นนำผลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างความผิดปกติรวมของฮาร์มอนิกแรงดันและกระแสกับปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นดัชนีในการบ่งบอกถึงปัญหาของฮาร์มอนิกที่กำลังจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าต่อไป

4. ผลการตรวจวัดและผลการทดสอบ

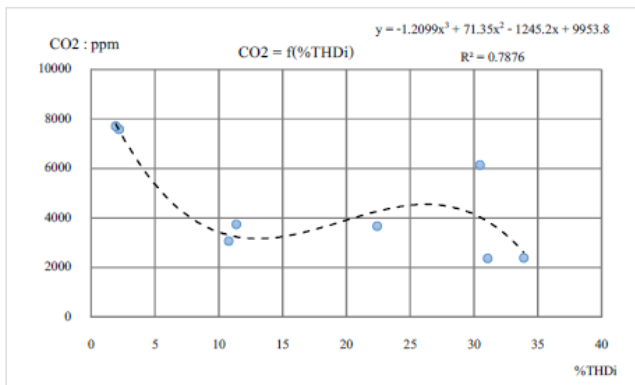
จากผลการตรวจวัดความผิดปกติของฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแส และผลการทดสอบเพื่อหาปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า นำมาทำการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความผิดปกติรวมของฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสกับปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงได้ดังต่อไปนี้



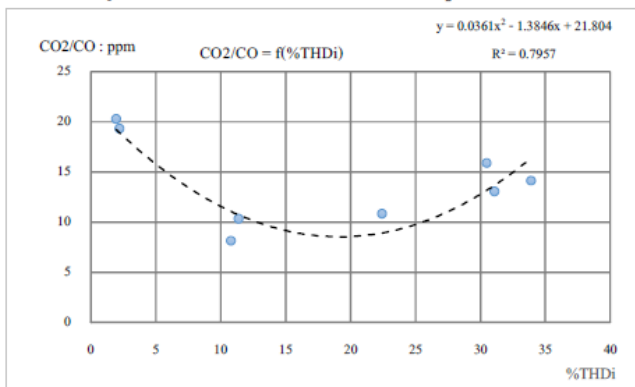
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง THDi กับ THDu



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CO กับ THDi



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CO₂ กับ THDi



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CO₂/CO กับ THDi

จากการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างความผิดปกติของแรงดันและกระแสกับปริมาณก๊าซฉนวนที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า จากรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 5 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างความผิดปกติของแรงดันและกระแสกับปริมาณก๊าซฉนวนที่เพิ่มขึ้นมีค่าเบี่ยงเบนเข้าใกล้ 1.0 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, R) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า R² และ R ความสัมพันธ์ของข้อมูล

ตัวแปรอิสระ(x)	ตัวแปรตาม (y)	R ²	R
THDi	THDv	0.6521	0.8075
THDi	CO	0.5982	0.7734
THDi	CO ₂	0.7876	0.8875
THDi	CO ₂ /CO	0.7957	0.8920

จากตารางที่ 2 พบว่าความสัมพันธ์ฮาร์มอนิกสรวมของกระแสกับปริมาณก๊าซฉนวนที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเข้าใกล้ 1.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน

5. สรุปผล

จากการศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดปกติของแรงดันและกระแสกับปริมาณก๊าซฉนวนที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถสรุปได้ว่า

1. ค่าความผิดปกติฮาร์มอนิกสรวมของแรงดันและกระแสกับปริมาณก๊าซฉนวนที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า มีความสอดคล้องและสัมพันธ์กัน

2. การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซฉนวนที่เพิ่มขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า ถือเป็นวิธีการพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการตรวจสอบสภาพทั่วไปของหม้อแปลงไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและสามารถบอกให้ทราบถึงความผิดปกติที่จะเริ่มก่อตัวขึ้นได้อย่างรวดเร็วทันทั่วกว่าวิธีการอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Std C57.110-2008, Recommended Practice for Establishing Liquid-filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.
- [2] IEEE Std C57.104-2008, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers.
- [3] IEC 60599:1999 Mineral oil-impregnated electrical equipment in service- Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis.
- [4] A. elmoudi, M. Lehtonen, Hasse Nordman “Effect of Harmonics on Transformers Loss of Life” IEEE conference on Electrical Insulation,2006.
- [5] Sumaryadi, Harry GUMILANG, Achmad SUSILO “Effect of Power System Harmonic on Degradation process of Transformer Insulation System”Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials,2009
- [6] U.S. Department of interior “Transformers: Basic, Maintenance, and Diagnostics” April 2005.



อิทธิพล อินทมาตย์ ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยศรีปทุม มีความสนใจด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง คุณภาพไฟฟ้า และเครื่องกลไฟฟ้า



สำเร็จ อินทมาตย์ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม มีความสนใจงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง คุณภาพไฟฟ้า ระบบป้องกันฟ้าผ่าและต่อลงดินในระบบไฟฟ้า