

การเปรียบเทียบผลการทดสอบหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน ภายใต้สภาวะโหลด แบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น

Comparison of testing results of Oil-immersed Transformer under Linear load and Non-linear load conditions

ประสิทธิ์ สุขเสริม และสิริวิช ทัดสวน*

Prasit Sukserm and Siriwich Tadsuan

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : siriwicht@sau.ac.th

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบหม้อแปลงจำหน่ายชนิด 3 เฟสแบบแช่น้ำมัน ต่อแบบ D/Y, 10 kVA, 380V/220V ระบายความร้อนแบบ ONAN ในกรณีที่หม้อแปลงใช้โหลดเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษา แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ร้อยละความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้า ร้อยละความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิขดลวด อุณหภูมิของน้ำมัน และอุณหภูมิที่สายนิวทรัล ขั้นตอนการทดสอบ ได้ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ที่บริเวณขดลวดและที่น้ำมันด้านบนของหม้อแปลง การทดสอบตอนแรก ใช้โหลดเป็นแบบเชิงเส้น ประกอบด้วยแท่งความร้อนและหลอดอินแคนเดสเซนต์ ส่วนตอนที่สองใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ประกอบด้วย รีคตีไฟเออร์แบบบริดจ์ ตัวเก็บประจุ แท่งความร้อนและหลอดอินแคนเดสเซนต์ ใช้เพาเวอร์มิเตอร์และดิจิตอลอสซิลโลสโคปในการวัดและบันทึกค่าพารามิเตอร์ ใช้ค่าค่า แอคคูสซิชั่น โมดูล ในการวัดค่าและบันทึกอุณหภูมิหม้อแปลง ผลลัพธ์ทำให้ทราบว่าค่ากระแสหม้อแปลงไฟฟ้า ค่าร้อยละความผิดเพี้ยนรวมของกระแสไฟฟ้า ค่าอุณหภูมิขดลวดของหม้อแปลง เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นนั้นมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้โหลดเชิงเส้นประมาณ 1.38 เท่า 24 เท่า และ 1.5 เท่า เรียงตามลำดับ ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้สามารถวางแผนการจ่ายโหลดหม้อแปลงเพื่อป้องกันหม้อแปลงเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนเกินขีดจำกัดได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน ฮาร์มอนิก โหลดไม่เป็นเชิงเส้น จุดร้อนสุด อุณหภูมิน้ำมันด้านบน

Abstract This research is a comparison of test results of three-phase transformer ,D/Y, 10 kVA, 380V/220V, ONAN cooling under linear and non-linear load. The purpose is to study the voltage, current, electrical power, %THD_V, %THD_i, temperature of winding, temperature of oil and temperature of neutral wire. Test procedure K type thermocouples are installed at the coil and at the top of the transformer oil. The first test use a linear load, it consists of heater and incandescent lamp. The second test use a non-linear load, it consists of bridge rectifier, capacitor, heater and incandescent lamp. Use digital oscilloscope and power meter to measure and record electrical parameter values and use data acquisition module to measure and record temperature of transformer. The results

indicate that the current of transformer, winding temperature of transformer when of non-linear loads are higher than linear loads of 1.38 times, 24 times and 1.5 times respectively. The benefit of this research is possible to plan the load on the transformer to prevent the transformer from overheating.

Keywords : Oil-immersed transformer, Harmonic, Non-linear load, Hottest-spot, Top-oil Temperature

1. บทนำ

ความร้อนของหม้อแปลงขณะใช้งานจะเป็นตัวกำหนดสมรรถนะการใช้งานของตัวหม้อแปลง ถ้าหม้อแปลงมีความร้อนต่ำจะทำให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดได้มากกว่าปกติ ในทางกลับกันถ้าหม้อแปลงมีความร้อนสูงจะทำให้ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดต่ำกว่าปกติ โดยที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง [1-4] เช่น อุณหภูมิของน้ำมัน อุณหภูมิที่จุดร้อนสุด และอุณหภูมิแวดล้อม เมื่อหม้อแปลงมีอุณหภูมิสูงกว่าขีดจำกัดสิ่งที่ตามมาคือจะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลง

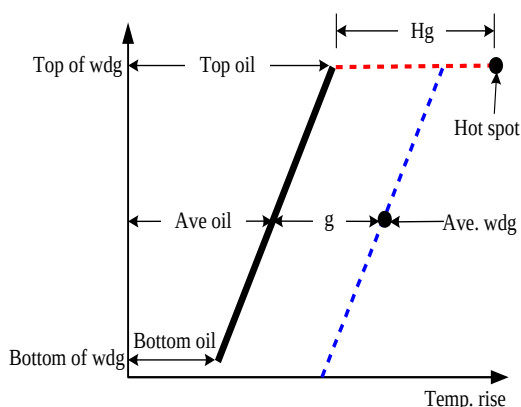
2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในหม้อแปลง

จาก [4] ได้มีการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับความร้อนหม้อแปลงดังรูปที่ 1 ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิน้ำมันภายในหม้อแปลงที่เพิ่มขึ้นจากด้านล่างขึ้นด้านบนจะเป็นเชิงเส้น
2. อุณหภูมิเพิ่มของตัวนำทุกๆ ตำแหน่งของขดลวดจะมีค่าเพิ่มเป็นเชิงเส้นและขนานกับเส้นอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมัน โดยมีค่าความแตกต่างคงที่ (g) ระหว่างเส้นทั้งสอง
3. อุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดจะสูงกว่าอุณหภูมิเพิ่มของตัวนำที่ด้านบน เนื่องมาจากค่าสูญเสียปลิกขอย (Stray Loss) ที่เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างจุดที่ร้อนสุดของขดลวดด้านบนกับน้ำมันด้านบน ได้จากค่า H

คูณกับ g โดยที่ H เป็นตัวประกอบมีค่าจาก 1.1 ถึง 1.5 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของหม้อแปลง ซึ่งกำหนดให้หม้อแปลงจำหน่ายมีค่าเท่ากับ 1.1 และหม้อแปลงกำลังขนาดกลางและขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ 1.3



รูปที่ 1 แผนผังความร้อน

2.2 การทดสอบและทำนายอุณหภูมิหม้อแปลง เพื่อหาค่า % อายุสูญเสียและอายุการใช้งานของหม้อแปลง

จาก [5, 6] ได้ทำการทดสอบเพื่อสืบสวนความร้อนของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่มีการระบายความร้อนแบบการหมุนเวียนของน้ำมันตามธรรมชาติ (OA) แบบที่มีการติดตั้งพัดลมเพิ่มขึ้น (FA) และแบบที่มีการทำให้น้ำมันหมุนเวียนเร็วขึ้นโดยการติดตั้งปั๊มเพิ่มขึ้นอีก (FOA) โดยใช้ตัวเทอร์โมคัปเปิลติดตั้งตามตำแหน่งขดลวดในถังหม้อแปลงที่ด้านล่างและด้านบน สุดท้ายได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบเทียบกับค่าคำนวณของ IEEE [2] มีความแตกต่างกัน

จาก [7] เป็นการพัฒนาโมเดลทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณจุดร้อนสุดของหม้อแปลงขนาด 250 MVA, 400 MVA ระบายความร้อนแบบ ONAF และ 605 MVA ระบายความร้อนแบบ OFAF โดยมีการเปลี่ยนแปลงภาระหลาย ๆ ช่วง (ตั้งแต่ไม่มีภาระจนถึงมากกว่าพิกัด) ค่าที่ได้จากโมเดลที่พัฒนาขึ้นมีค่าผิดพลาดน้อยกว่าโมเดลของ IEEE [3] เล็กน้อย จาก [8] ได้วิจัยในเรื่องของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกับจุดร้อนสุดของหม้อแปลง ซึ่งมีตัวแปรที่นำมาพิจารณาเพิ่มเติมจาก IEEE [1-3] คือความเร็วลมและผลกระทบของรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยใช้ข้อมูลจริงที่รวบรวมมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 100 MVA โดยใช้ทูลบล็อกซิมมูลิ่งของโปรแกรมแมทแลบมาจำลองหาอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดของหม้อแปลง

และจาก[4] ได้กล่าวไว้ว่ากรณีที่อุณหภูมิที่ตัวหม้อแปลงขณะใช้งานสูงกว่าอุณหภูมิขีดจำกัดของหม้อแปลง ที่ทุก ๆ 6°C จะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงครึ่งหนึ่ง โดยที่อายุใช้งานของหม้อแปลงตามปกติมีอายุ 20 ปี จาก [1-3] อายุของฉนวนหรือความเสื่อมสภาพของฉนวนขึ้นกับฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา ในการพิจารณาที่ฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งเป็น

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆ ของฉนวนจะมีลักษณะแตกต่างกัน ที่บริเวณจุดร้อนสุดจะได้รับความเสื่อมสภาพมากกว่าบริเวณอื่นๆ ในการแนะนำสมมติฐานของค่าความเสื่อมสภาพของฉนวนตามทฤษฎีสมการของ Arrhenius ได้กล่าวไว้ว่า ที่อายุของฉนวนจะมีฟังก์ชันเหมือนกับลอการิทึม ดังสมการที่ 1

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

เมื่อ

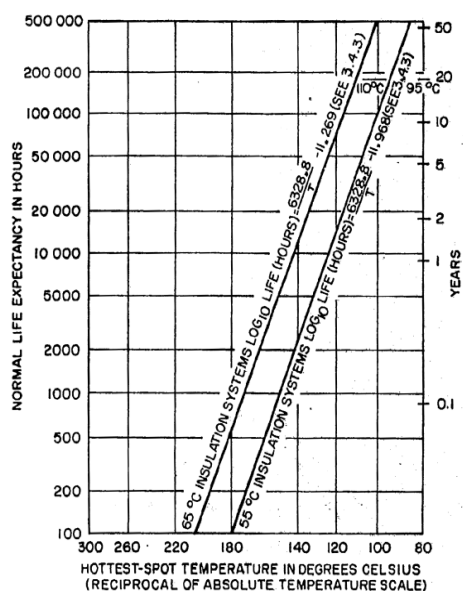
A, B คือค่าคงที่ ดังตารางที่ 1 และ $T = \Theta_h + 273$

ดังนั้น จะได้อายุการใช้งาน หน่วยชั่วโมง ดังสมการที่ 2 และความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงดังรูปที่ 2 และพารามิเตอร์ A, B มีค่าดังตารางที่ 1 ส่วนขีดจำกัดของกระแสและอุณหภูมิในสภาวะมากกว่าพิกัดหม้อแปลง [4] แสดงดังตารางที่ 2

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

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ A, B ของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ขนาด (kVA) ต่างๆ [1-3]

ขนาดหม้อแปลง	อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด, $^{\circ}\text{C}$	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



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจุดร้อนสุดกับอายุการใช้งานหม้อแปลงที่หม้อแปลงมีขนาด ≤ 500 kVA

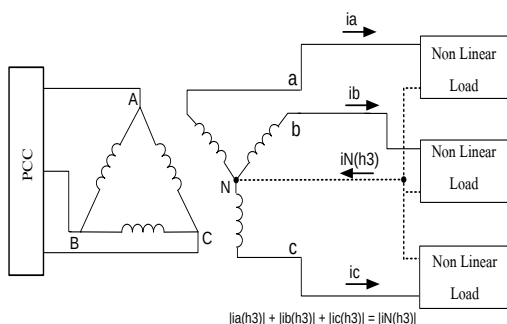
ตารางที่ 2 ชัดจำกัดของกระแสและอุณหภูมิในการภาระในสภาวะมากกว่าปกติหม้อแปลง

	หม้อแปลงจำหน่าย	หม้อแปลงขนาดกลาง	หม้อแปลงขนาดใหญ่
วัฏจักรภาระปกติ			
กระแส (P.U)	1.5	1.5	1.5
อุณหภูมิที่จุดร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	140	140	140
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน ($^{\circ}\text{C}$)	105	105	105
วัฏจักรอุณหภูมิช่วงเวลายาว ๆ			
กระแส (P.U)	1.8	1.5	1.3
อุณหภูมิที่จุดร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	150	140	130
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน ($^{\circ}\text{C}$)	115	115	115
วัฏจักรอุณหภูมิช่วงเวลาสั้น ๆ			
กระแส (P.U)	2.0	1.8	1.5
อุณหภูมิที่จุดร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	*	160	160
อุณหภูมิน้ำมันด้านบน ($^{\circ}\text{C}$)	*	115	115

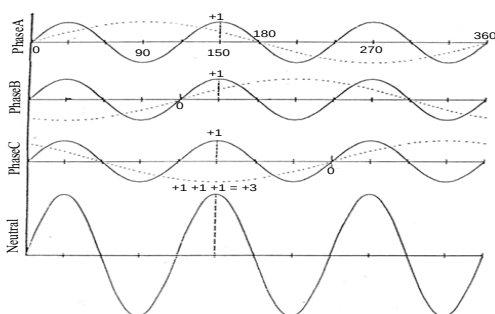
หมายเหตุ* ในทางปฏิบัติไม่สามารถควบคุมช่วงเวลาระหว่างที่เกิดภาระฉุกเฉินของหม้อแปลงจำหน่ายได้ เมื่อจุดร้อนสุดมีอุณหภูมิมากกว่า 140°C ถึง 160°C จะทำให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งเป็นอันตรายกับความแข็งแรงของไดอิเล็กตริกในหม้อแปลง

2.3 อุณหภูมิหม้อแปลงที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิก

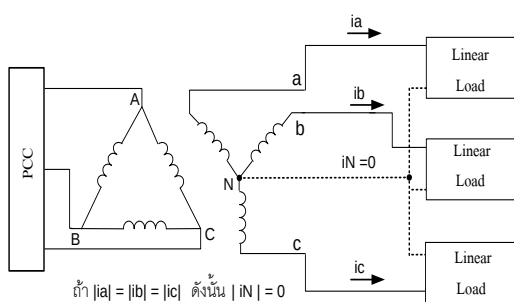
จากงานวิจัย [9] ได้มีการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันชนิด 3 เฟส ต่อกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ชนิด 3 เฟส ผลลัพธ์ทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ $6K \pm 1$ ในตัวหม้อแปลง ส่งผลทำให้เกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้นที่ตัวหม้อแปลง แต่ในกรณีที่เป็นโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ชนิด 1 เฟส ซึ่งในกรณีนี้จะมีอุปกรณ์ที่ใช้งานในปัจจุบันอยู่เป็นจำนวนมาก อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้จะกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกลำดับเลขคี่ 3, 5, 7, 9,... แต่ที่สำคัญคือกระแสฮาร์โมนิกเลขคี่คูณสาม (Triplen harmonics) เช่น 3, 9, 15, 21, .. ของแต่ละเฟสจะไหลไปรวมกันที่สายนิวทรัล ทำให้ที่สายนิวทรัลนี้มีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกเลขคี่คูณสามสูง (โดยมากพิจารณาเฉพาะลำดับที่ 3 สาเหตุเพราะมีปริมาณสูงกว่าลำดับ 9, 15...อย่างมาก) ถ้ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ทางด้านทุติยภูมิแต่ละเฟสเท่ากัน กระแสที่สายนิวทรัลนี้จะสูงเป็น 3 เท่าของกระแสเฟสแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 (แต่ถ้าเป็นโหลดเชิงเส้น กรณีที่ปริมาณกระแสแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน กระแสที่สายนิวทรัลจะเท่ากับศูนย์ แสดงดังรูปที่ 5) และกระแสฮาร์โมนิกต่าง ๆ จะเหนี่ยวนำไปยังรูปเคลด้าของขดลวดปฐมภูมิแล้วไหลย้อนไปสู่ระบบจำหน่าย แต่กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 จะไม่สามารถไหลย้อนไปยังระบบจำหน่ายได้ แต่จะไหลวนอยู่ในรูปของขดลวดปฐมภูมิ



รูปที่ 3 วงจรไฟฟ้าการต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ D/Y โดยใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 1 เฟส



รูปที่ 4 สัญญาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่สามของแต่ละเฟสของหม้อแปลง 3 เฟส แบบ D/Y โหลดรวมกันที่สายนิวทรัล



รูปที่ 5 วงจรไฟฟ้าการต่อหม้อแปลง 3 เฟส แบบ D/Y โดยใช้โหลดแบบเชิงเส้นชนิด 1 เฟส

จากทฤษฎีแนวคิดที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น จุดที่น่าสนใจศึกษาเป็นอย่างมากคืออุณหภูมิหม้อแปลงที่มีปริมาณสูงขึ้นอันเนื่องมาจากกระแส

ฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่ เพราะถ้าสามารถทราบถึงปริมาณอุณหภูมิที่สูงสุดที่เกิดขึ้น ได้ว่าเป็นที่เท่าของค่าอุณหภูมิที่แผ่นป้ายชื่อ ก็ทำให้สามารถวางแผนการจ่ายโหลดหม้อแปลงเพื่อป้องกันหม้อแปลงเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนเกินขีดจำกัดได้ ส่งผลถึงเพิ่มเสถียรภาพในการจ่ายพลังงาน และเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนได้เป็นอย่างดี

3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

โดยขั้นตอนแรกใช้โหลดประเภทเชิงเส้น เพื่อทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้า ประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง ร้อยละของความคิดเห็นรวมของแรงดันและของกระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของหม้อแปลง ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิที่ขดลวดทางด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของแต่ละเฟส ที่บริเวณน้ำมันด้านบนที่สายนิวทรัล ตอนที่สองเปลี่ยนมาใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อทดสอบหาค่าต่าง ๆ เหมือนกันกับแบบโหลดเชิงเส้น จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า และค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบมีความแตกต่างกันปริมาณเล็กน้อยเพียงใด

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- Data Acquisition Module ยี่ห้อ ADAM 4018
- Thermocouple type K
- Power Meter ยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX True rms F25
- Digital Oscilloscope ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL1640
- Differential probe ยี่ห้อ Tektronix รุ่น P5200
- Hall effect current transducer

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

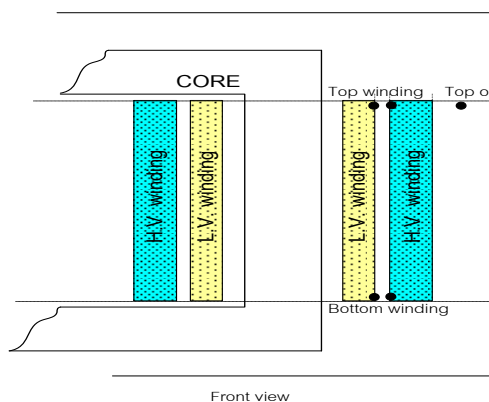
- การทดสอบและผลการทดสอบแรงดัน กระแสและ

อุณหภูมิหม้อแปลงกรณีโหลดเชิงเส้น

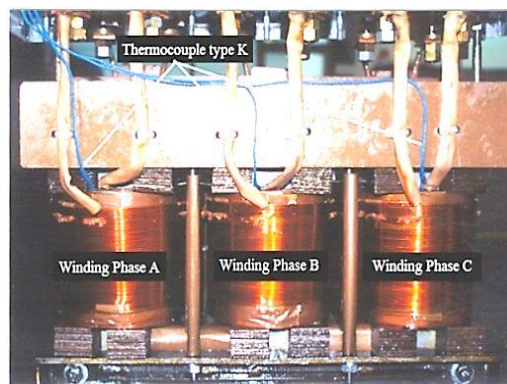
ใช้ Data Acquisition Module ยี่ห้อ ADAM รุ่น 4018 ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งตามตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ บริเวณขดลวดปฐมภูมิซึ่งเป็นขดลวดแรงดันสูงที่ขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งเป็นขดลวดแรงดันต่ำทั้งด้านบนและด้านล่าง และที่บริเวณน้ำมันด้านบนที่ระดับความสูงเดียวกับขดลวดด้านบน และที่สายนิวทรัล แสดงดังรูปที่ 6 ส่วนรูปที่ 7 เป็นภาพจริงที่มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลของคอยล์ทั้งสามเฟส รูปที่ 8 เป็นภาพจริงจุดที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบริเวณสายนิวทรัล และรูปที่ 9 เป็นการวัดอุณหภูมิแวดล้อมรอบ ๆ หม้อแปลงทั้งสองจุด

ต่อวงจรการทดลองดังรูปที่ 10 โดยใช้แท่งความร้อนและหลอดอินแคนเดสเซนต์เป็นโหลดแบบเชิงเส้นจ่ายแรงดันที่พิกัดหม้อแปลง 380 V ปรับโหลดให้มีกระแสสายที่เป็นคลื่นมูลฐานที่พิกัดหม้อแปลง 15.19A (ในทางปฏิบัติอาจได้ค่าที่ใกล้เคียง) ทดลองไปจนกว่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนไม่เปลี่ยนแปลง

บันทึกค่ากระแส แรงดันต่าง ๆ และพารามิเตอร์อื่น ๆ ด้วยเพาเวอร์มิเตอร์ ยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX รุ่น True rms F25 และวัดรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ด้วย Digital Oscilloscope ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL1640 รูปสัญญาณจะถูกบันทึกด้วยไฟล์นามสกุล BMP และ CSV จากนั้นนำไฟล์นามสกุล CSV ดังกล่าวไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้สมการที่ 3 ถึง 21 ในการทดสอบได้ทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง โดยค่าของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 25 และอุณหภูมิหม้อแปลงได้ทำซ้ำจำนวน 5 ครั้ง โดยค่าเฉลี่ยอุณหภูมิหม้อแปลงดังรูปที่ 26



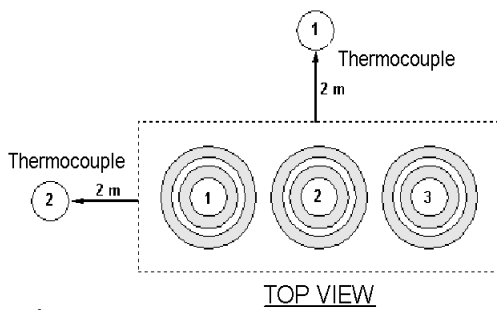
รูปที่ 6 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน



รูปที่ 7 ภาพจริงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 8 ภาพจริงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ลวดตัวนำสายนิวทรัล



รูปที่ 9 การวัดอุณหภูมิแวดล้อมรอบๆ หม้อแปลงที่ทดสอบจำนวน 2 ตำแหน่ง

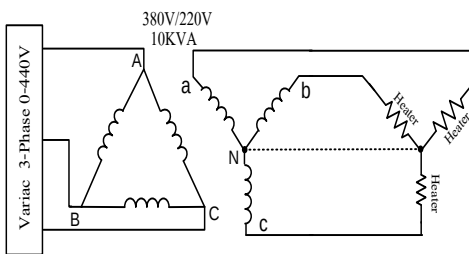
ดังนั้น

$$Q_{(h)} = V_h \cdot I_h \cdot \sin \phi_h \quad (7)$$

$$Q_T = \sum_{h=1}^{\infty} Q_{(h)} \quad (8)$$

ดังนั้น

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} \quad (9)$$



รูปที่ 10 วงจรไฟฟ้าการต่อหม้อแปลงเพื่อทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง โดยใช้โหลดแบบเชิงเส้นชนิด 1 เฟส

$$DPF = \frac{P_1}{V_1 I_1} = \frac{V_1 I_1 \cos \phi}{V_1 I_1} = \cos \phi_1 \quad (10)$$

$$PF_{(h)} = \frac{P_{(h)}}{S_{(h)}} \quad (11)$$

$$PF = \frac{P}{S} \quad (12)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (3)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (4)$$

$$P_{(h)} = V_h \cdot I_h \cdot \cos \phi_h \quad (5)$$

ดังนั้น

$$P_T = \sum_{h=1}^{\infty} P_{(h)} \quad (6)$$

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (13)$$

$$\%THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (14)$$

$$\sum P_{3T} = P_{T1} + P_{T2} \quad (15)$$

$$\sum Q_{3T} = Q_{T1} + Q_{T2} \quad (16)$$

$$\sum S_{3T} = \sqrt{(\sum P_{3T})^2 + (\sum Q_{3T})^2} \quad (17)$$

$$\sum PF_3 = \frac{\sum P_{3T}}{\sum S_{3T}} \quad (18)$$

$$K - \text{factor} = \frac{\sum I_h^2 \cdot h^2}{\sum I_h^2} \quad (19)$$

$$\% \text{Capacity} = \sqrt{\frac{1 + P_{\text{ECR}}}{1 + K * P_{\text{ECR}}}} \quad (20)$$

$$\text{New kVA} = \text{OldkVA} * \% \text{Capacity} \quad (21)$$

$\% \text{THD}_V$ คือ ร้อยละความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันไฟฟ้า

$\% \text{THD}_I$ คือ ร้อยละความผิดเพี้ยนรวมของกระแสไฟฟ้า

P_{T1} คือกำลังไฟฟ้าจริงจากการวัดแรงดันไฟฟ้าเฟส A-C และกระแสไฟฟ้าสายของเฟส A, W

P_{T2} คือกำลังไฟฟ้าจริงจากการวัดแรงดันไฟฟ้าเฟส B-C และกระแสไฟฟ้าสายของเฟส B, W

$\sum P_{3T}$ คือกำลังไฟฟ้าจริงรวม 3 เฟส, W

$\sum Q_{3T}$ คือกำลังไฟฟ้าเสมือนรวม 3 เฟส, Var

$\sum S_{3T}$ คือกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏรวม 3 เฟส, VA

$\sum PF_3$ คือตัวประกอบกำลังเฉลี่ย 3 เฟส

เมื่อ

V_1 คือแรงดันอาร์เอ็มเอสคลื่นมูลฐาน, V

V_h คือแรงดันอาร์เอ็มเอสลำดับ h ของฮาร์โมนิก, V

V_{rms} คือแรงดันประสิทธิผล, V

I_1 คือกระแสอาร์เอ็มเอสคลื่นมูลฐาน, A

I_h คือกระแสอาร์เอ็มเอสลำดับ h ของฮาร์โมนิก, A

I_{rms} คือกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล, A

P_T คือกำลังไฟฟ้าจริงรวม, W

$P(h)$ คือกำลังไฟฟ้าจริงลำดับ h, W

P_{OUT} คือกำลังไฟฟ้าขาออกของมอเตอร์, W

$Q(h)$ คือกำลังไฟฟ้าเสมือนลำดับ h, Var

Q_T คือกำลังไฟฟ้าเสมือนรวม, Var

$S(h)$ คือกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏลำดับ h, VA

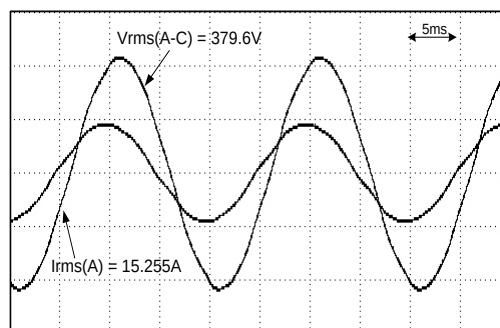
S_T คือกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏรวม, VA

DPF คือตัวประกอบกำลังของคลื่นมูลฐาน

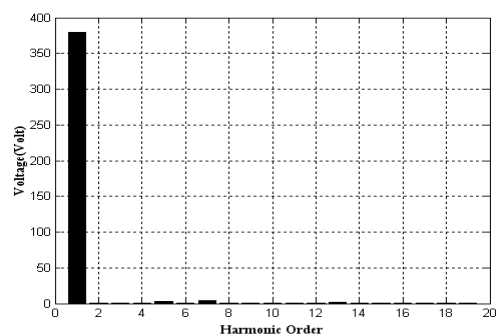
$PF(h)$ คือตัวประกอบกำลังที่ลำดับ h ของฮาร์โมนิก

PF คือตัวประกอบกำลัง

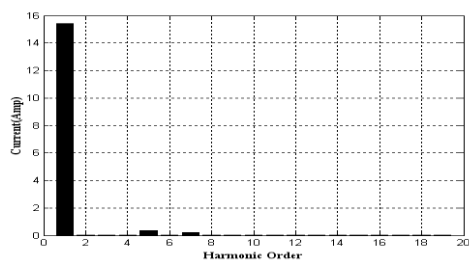
ϕ_h คือมุมแตกต่างระหว่าง V_h กับ I_h



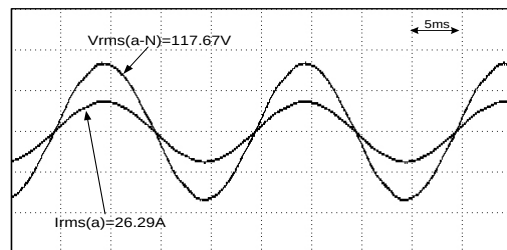
รูปที่ 11 สันญาณแรงดัน(A-C) และกระแส(A) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



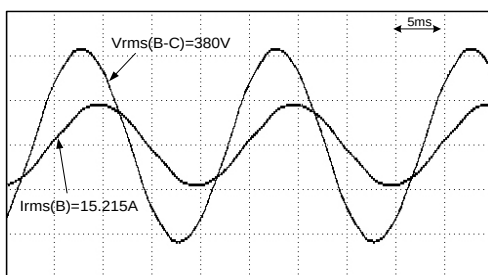
รูปที่ 12 สเปกตรัมแรงดัน(A-C) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



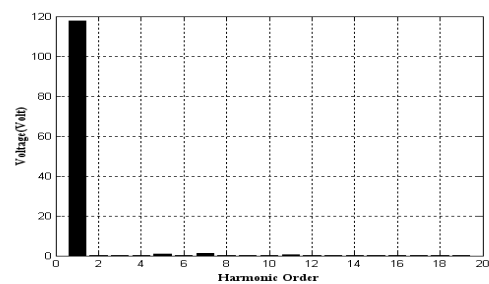
รูปที่ 13 สเปกตร้ากระแส(A) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



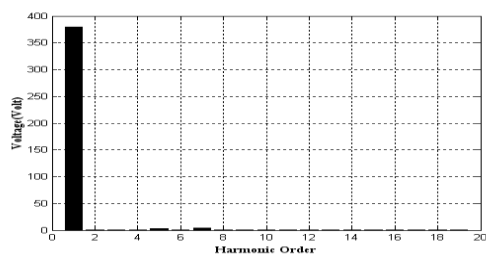
รูปที่ 17 สันญาณแรงดัน(a-N) และกระแส(a) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



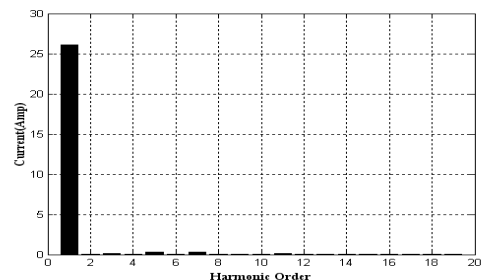
รูปที่ 14 สันญาณแรงดัน(B-C) และกระแส(B) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



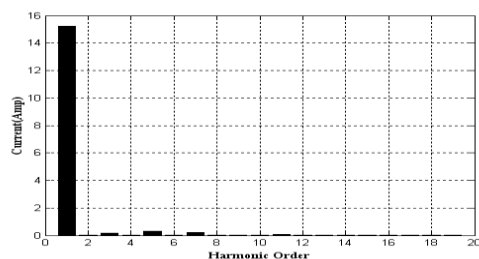
รูปที่ 18 สเปกตร้าแรงดัน(a-N) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



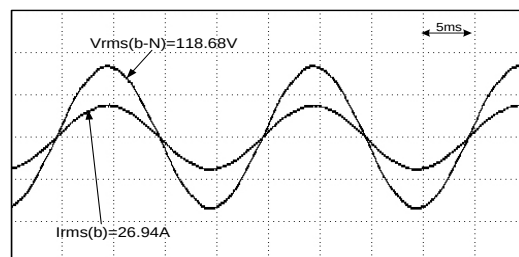
รูปที่ 15 สเปกตร้าแรงดัน(B-C) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



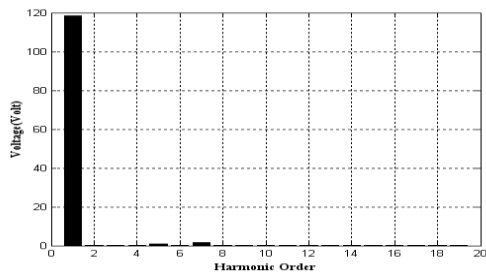
รูปที่ 19 สเปกตร้ากระแส(a) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



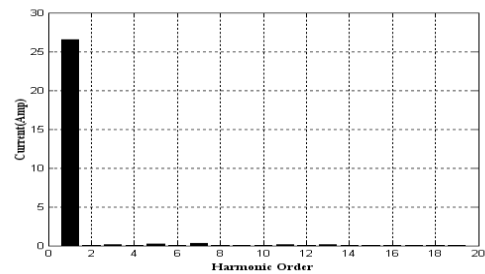
รูปที่ 16 สเปกตร้ากระแส(B) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



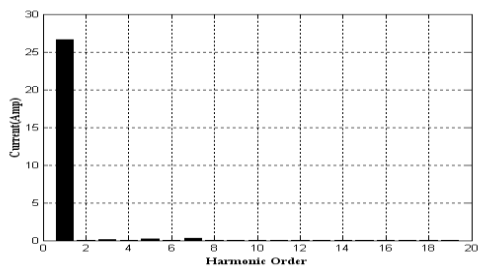
รูปที่ 20 สันญาณแรงดัน(b-N) และกระแส(b)ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



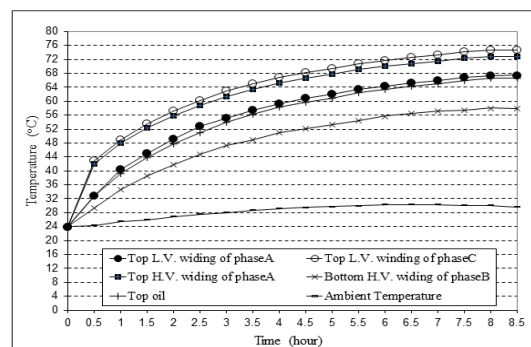
รูปที่ 21 สเปกตรัมแรงดัน(b-N) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



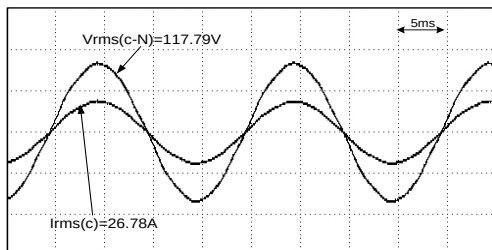
รูปที่ 25 สเปกตรัมกระแส(c) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



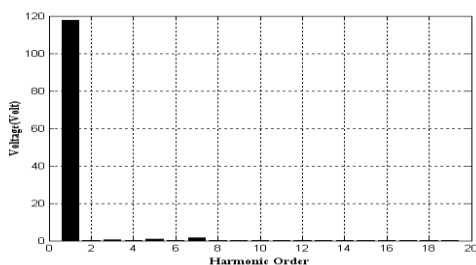
รูปที่ 22 สเปกตรัมกระแส(b) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



รูปที่ 26 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของหม้อแปลงเมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



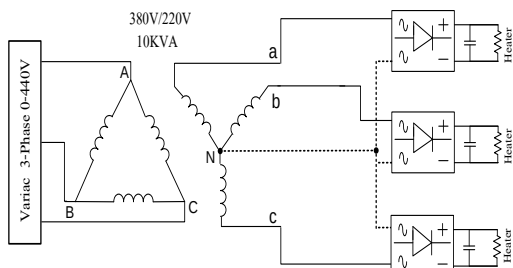
รูปที่ 23 สัญญาณแรงดัน(c-N) และกระแส (c) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น



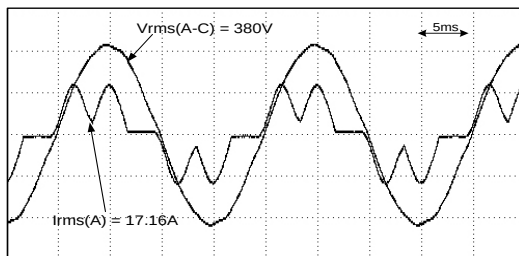
รูปที่ 24 สเปกตรัมแรงดัน(c-N) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น

-การทดสอบและผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิหม้อแปลงกรณีให้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น

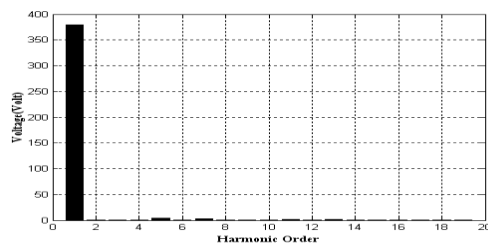
เปลี่ยนการต่อวงจรให้เป็นดังรูปที่ 27 โดยให้เป็นโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ใช้ตัวเรกติฟายเออร์ตัวเก็บประจุ แทนถ่วงความร้อน ส่วนขั้นตอนการทดลองเหมือนกับการใช้โหลดเชิงเส้น ค่าของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 27 ถึงรูปที่ 45 และค่าเฉลี่ยอุณหภูมิหม้อแปลงแสดงดังรูปที่ 46



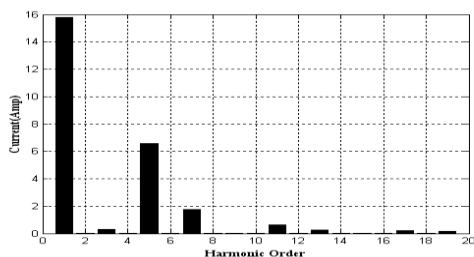
รูปที่ 27 วงจรไฟฟ้าการต่อหม้อแปลง เพื่อทดสอบ
อุณหภูมิหม้อแปลง โดยใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น
ชนิด 1 เฟส



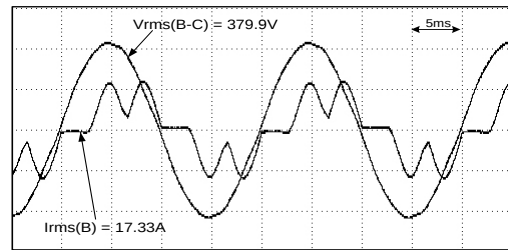
รูปที่ 28 สัญญาณแรงดัน (A-C) และกระแส (A)
ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



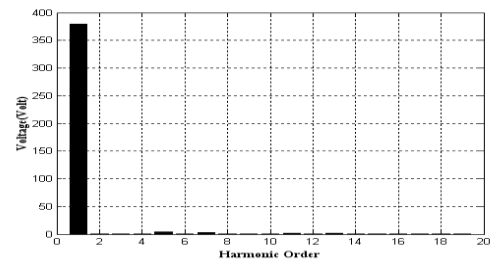
รูปที่ 29 สเปกตรัมแรงดัน (A-C) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้
โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



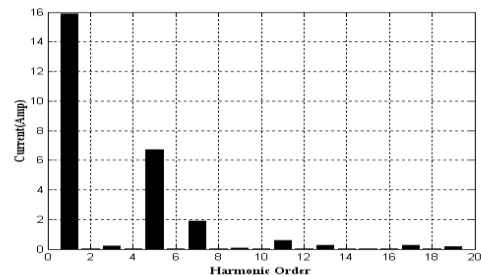
รูปที่ 30 สเปกตรัมกระแส (A) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลด
ไม่เป็นเชิงเส้น



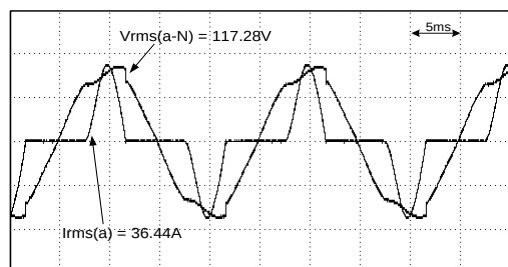
รูปที่ 31 สัญญาณแรงดัน (B-C) และกระแส (B) ด้าน
ปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



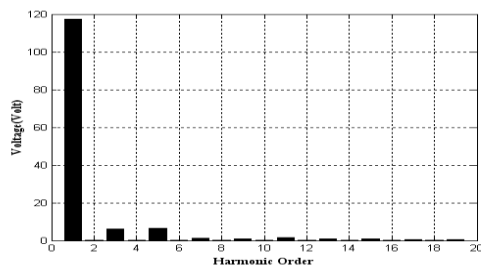
รูปที่ 32 สเปกตรัมแรงดัน (B-C) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้
โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



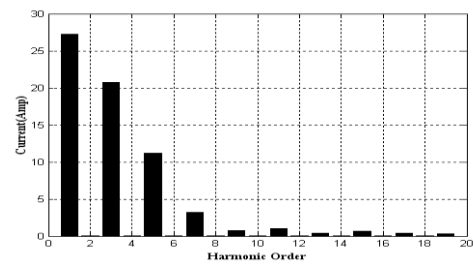
รูปที่ 33 สเปกตรัมกระแส (B) ด้านปฐมภูมิ เมื่อใช้โหลด
ไม่เป็นเชิงเส้น



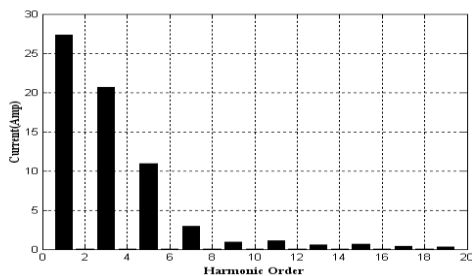
รูปที่ 34 สัญญาณแรงดัน (a-N) และกระแส (a) ด้าน
ทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



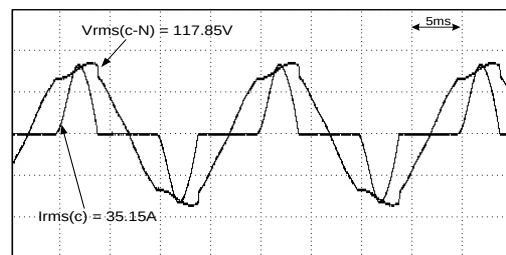
รูปที่ 35 สเปกตรัมแรงดัน (a-N) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



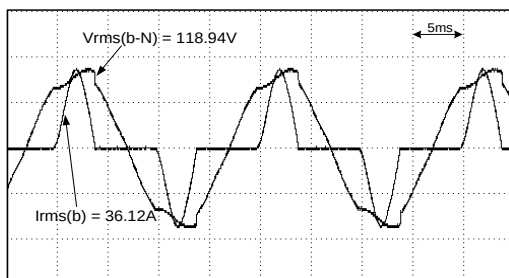
รูปที่ 39 สเปกตรัมกระแส (b) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



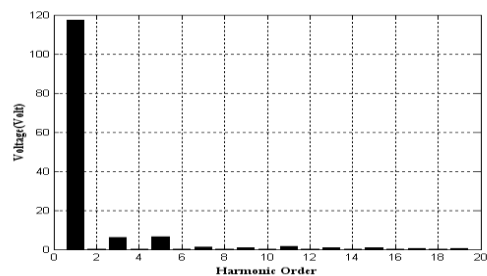
รูปที่ 36 สเปกตรัมกระแส (a) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



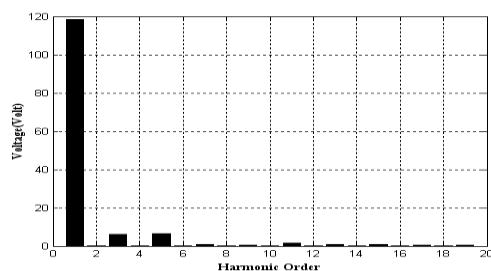
รูปที่ 40 สันญาณแรงดัน (c-N) และกระแส (c) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



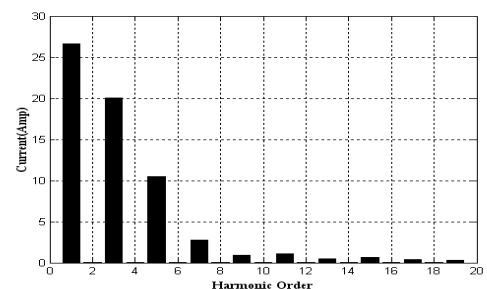
รูปที่ 37 สันญาณแรงดัน (b-N) และกระแส (b) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



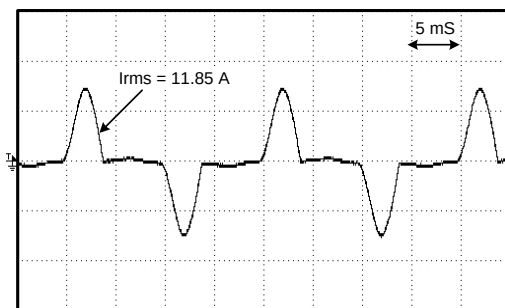
รูปที่ 41 สเปกตรัมแรงดัน (c-N) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



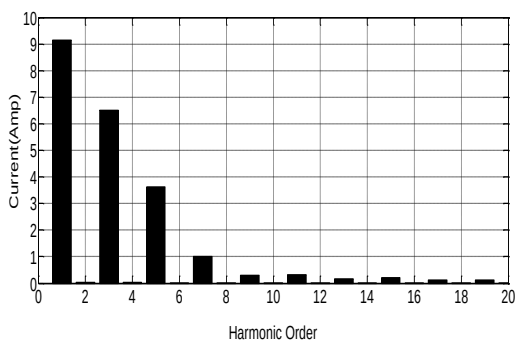
รูปที่ 38 สเปกตรัมแรงดัน (b-N) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



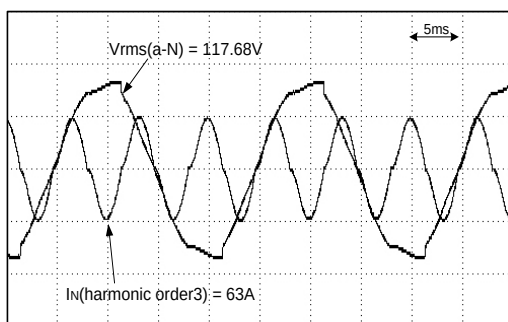
รูปที่ 42 สเปกตรัมกระแส (c) ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



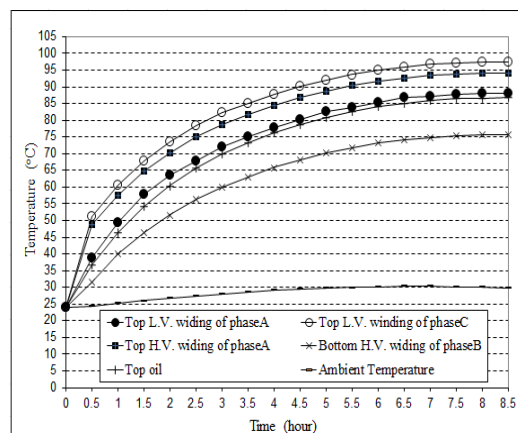
รูปที่ 43 กระแสเฟสที่ไหลอยู่ในรูปเคลด้าขดลวด
ด้านปฐมภูมิ



รูปที่ 44 สเปกตร้ากระแสเฟสในรูปเคลด้าขดลวดด้าน
ปฐมภูมิ



รูปที่ 45 สัญญาณแรงดัน(a-N) และกระแสสายนิวทรัล
ด้านทุติยภูมิ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 46 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของหม้อ
แปลงเมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

โดยจะแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ประเด็น ได้แก่ ประเด็นแรกเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่คำนวณหรือวัดได้กรณีที่ เป็น โหลดเชิงเส้นกับ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น และประเด็นที่สองเปรียบเทียบอุณหภูมิหม้อแปลงที่วัดได้กรณีที่ เป็น โหลดเชิงเส้นกับ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

-เปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ กรณีที่เป็น โหลดเชิงเส้นกับ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

เมื่อพิจารณาด้านปฐมภูมิ จากตารางที่ 3

- ค่ากระแสสาย (I_{rms}) ซึ่งเป็นกระแสสายทางเข้าหม้อแปลงด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง กรณีที่เป็น โหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าประมาณ 17.2 A ซึ่งคิดเป็น 1.13 เท่าของโหลดเชิงเส้น สาเหตุเนื่องมาจากจุดที่ทำการวัดมีกระแสรั่มอนิกลำดับที่ $6K \pm 1$ (5, 7, 11, 13,) สามารถแสดงสเปกตร้ากระแสได้ดังรูปที่ 30 และรูปที่ 33

- ค่า %THD_i ทางด้านปฐมภูมิกรณีที่ เป็น โหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าประมาณ 44.17% ซึ่งคิดเป็น 11.87 เท่าของ

โหลดเชิงเส้น สาเหตุเนื่องมาจากจุดที่ทำการวัดมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ $6K \pm 1$ ร่วมกับกระแสคลื่นมูลฐาน

- ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) ทางด้านปฐมภูมิกรณีที่เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่า 10.425 kW สูงกว่ากรณีโหลดเชิงเส้น 360W สาเหตุเพราะเมื่อเกิดกระแสฮาร์มอนิกต่างๆ ย่อมทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดที่แกนเหล็ก[9] และที่ตัวถังหม้อแปลงเพิ่มมากขึ้นกว่ากรณีที่ใช้โหลดเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว

- จากรูปที่ 43 เป็นกระแสเฟสที่โวลุ่มอยู่ในรูปเคเลด้าขดลวดปฐมภูมิ เห็นได้ว่ามีความผิดเพี้ยนจากความเป็นรูปคลื่นไซน์สูง ส่วนรูปที่ 44 เป็นสเปกตรัมกระแสเฟสในรูปเคเลด้าของขดลวดปฐมภูมิที่มีฮาร์มอนิกลำดับเลขที่ (3, 5, 7, 9, ...) ปริมาณสูง ถ้าพิจารณารูปที่ 30 หรือรูปที่ 33 จะวัดได้เฉพาะลำดับที่ 5 และลำดับที่ 7 มีปริมาณสูงเท่านั้น แต่ไม่มีลำดับที่ 3 ให้เห็น สาเหตุเพราะกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีปริมาณ 6.5A โหลดอยู่แต่เฉพาะในรูปเคเลด้าของขดลวดปฐมภูมิ ไม่ยอมไหลออกไปยังแหล่งจ่ายเหมือนกับกระแสฮาร์มอนิกลำดับ 5 และลำดับที่ 7

เมื่อพิจารณาด้านทุติยภูมิ จากตารางที่ 4

- ค่ากระแสสาย (I_{rms}) ซึ่งเป็นกระแสทางออกด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง กรณีที่เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแต่ละเฟสมีค่าประมาณ 36 A ซึ่งคิดเป็น 1.38 เท่าของโหลดเชิงเส้น สาเหตุเนื่องมาจากจุดที่ทำการวัดมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขที่ แสดงสเปกตรัมกระแสได้ดังรูปที่ 36, 39, 42 เห็นได้ว่ามีสเปกตรัมกระแสคลื่นมูลฐานและกระแสฮาร์มอนิกเลขที่มีปริมาณมากลดหลั่นลงตามลำดับ

- ค่า %THD_i ทางด้านทุติยภูมิกรณีที่เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้น มีค่าประมาณ 86% ซึ่งคิดเป็น 23.9 เท่าของโหลดเชิงเส้น สาเหตุเนื่องมาจากจุดที่ทำการวัดมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขที่มีปริมาณสูง และถ้าสังเกตยังมีค่า %THD_i สูงกว่าด้านปฐมภูมิอีกด้วย ที่เป็นเช่นนี้

เพราะด้านปฐมภูมิจุดที่ทำการวัดมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ $6K \pm 1$ ซึ่งมีค่าความผิดเพี้ยนน้อยกว่าแบบฮาร์มอนิกเลขที่

- ค่า %THD_v ทางด้านทุติยภูมิกรณีที่เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าประมาณ 8% ซึ่งคิดเป็น 3.8 เท่าของโหลดเชิงเส้น สาเหตุเนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิกเลขที่ต่าง ๆ ไหลย้อนผ่านอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงที่ต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 และลำดับที่ 5 ไปรวมกับแรงดันคลื่นมูลฐาน ทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามากแสดงได้ดังรูปที่ 34, 37, 40 และรูปที่ 35, 38, 40 เป็นสเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้า เห็นได้ว่าเกิดแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5 มีปริมาณสูงเห็นได้อย่างชัดเจนที่จุดต่อร่วมทางด้านขดทุติยภูมินี้ไม่เหมาะกับการใช้งานต่อร่วมกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ เพราะมีแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5 เป็นแหล่งจ่ายร่วมกับคลื่นมูลฐาน อาจจะทำให้เกิดผลเสียหรืออันตรายกับอุปกรณ์เหล่านั้นได้

- จากรูปที่ 45 ในกรณีที่ใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นของแต่ละเฟสมีค่าสมมูลกัน ทำให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 โหลดในสายนิวทรัลมีค่า 63A สูงกว่ากรณีที่เป็โหลดเชิงเส้น 140 เท่า สาเหตุเพราะกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ของแต่ละเฟส (รูปที่ 36, 39, 42) มีค่าประมาณเฟสละ 21 A โหลดไปรวมกันที่สายนิวทรัล ทำให้ที่สายนิวทรัลมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ประมาณ 63 A

ตารางที่ 3 ข้อมูลต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้าน

ขดลวด Primary

	Primary winding	
	Linear load	Non-linear load
$V_{rms}(A-C) \dots V$	379.6	379.8
$V_1(A-C) \dots V$	379.5	379.7
$I_{rms}(A) \dots A$	15.255	17.161
$I_{lrms}(A) \dots A$	15.244	15.828
$P_{T1} \dots W$	5,255	5,436
$Q_{T1} \dots Var$	2424.4	2601.1
$S_{T1} \dots VA$	5,787.1	6,326.5
$\%THD_V(A-C)$	1.901	1.939
$\%THD_I(A)$	3.722	44.175
$PF(A-C)$	0.908	0.902
$DPF(A-C)$	0.909	0.902
$V_{rms}(B-C) \dots V$	380	379.9
$V_1(B-C) \dots V$	379.9	379.8
$I_{rms}(B) \dots A$	15.215	17.330
$I_{lrms}(B) \dots A$	15.204	15.855
$P_{T2} \dots W$	4,810	4,989
$Q_{T2} \dots Var$	3,202	3,329
$S_{T2} \dots VA$	5,778.4	5,997.6
$\%THD_V(B-C)$	1.773	1.842
$\%THD_I(B)$	3.701	44.144
$PF(B-C)$	0.832	0.831
$DPF(B-C)$	0.832	0.833
$P_{3T} = P_{T1} + P_{T2} \dots W$	10,065	10,425
$Q_{3T} = Q_{T1} + Q_{T2} \dots Va$	777.7	728
$S_{3T} = \sqrt{P_{3T}^2 + Q_{3T}^2} \dots VA$	10,095	10,450
$\sum PF_3 = \frac{\sum P_{3T}}{\sum S_{3T}}$	0.997	0.997

ตารางที่ 4 ข้อมูลต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้าน

ขดลวด Secondary

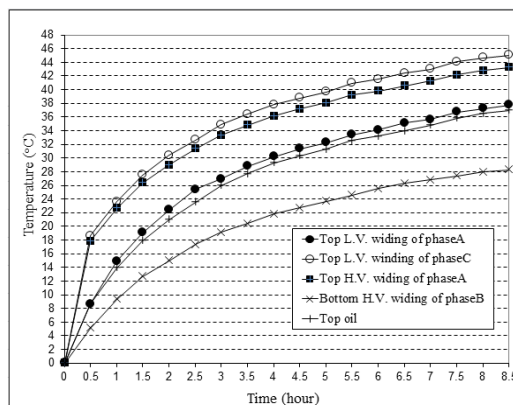
	Secondary winding	
	Linear load	Non-linear load
$V_{rms}(a-n) \dots V$	117.668	117.679
$V_1(a-n) \dots V$	117.633	117.280
$I_{rms}(a) \dots A$	26.285	36.436
$I_{lrms}(a) \dots A$	26.259	27.535
$P_{T1} \dots W$	3,089.7	3,149.5
$Q_{T1} \dots Var$	7.889	228.468
$S_{T1} \dots VA$	3,090	3,157
$\%THD_V(a-n)$	2.121	8.255
$\%THD_I(a)$	3.568	86.688
$PF(a-n)$	1.00	0.997
$DPF(a-n)$	1.00	0.999
$V_{rms}(b-n) \dots V$	118.68	118.939
$V_1(b-n) \dots V$	118.60	118.555
$I_{rms}(b) \dots A$	26.94	36.122
$I_{lrms}(b) \dots A$	26.909	27.237
$P_{T2} \dots W$	3194.3	3,151.4
$Q_{T2} \dots Var$	12.574	237.788
$S_{T2} \dots VA$	3,193.8	3155.7
$\%THD_V(b-n)$	2.028	8.047
$\%THD_I(b)$	3.426	87.151
$PF(b-n)$	1.00	0.997
$DPF(b-n)$	1.00	0.999
$V_{rms}(c-n) \dots V$	117.787	117.845
$V_1(c-n) \dots V$	117.756	117.457
$I_{rms}(c) \dots A$	26.780	35.149
$I_{lrms}(c) \dots A$	26.752	26.651
$P_{T3} \dots W$	3,151.2	3,057.5

$Q_{T3} \dots \text{Var}$	12.706	151.858
$S_{T3} \dots \text{VA}$	3,152	3,061.1
$\% \text{THD}_V(\text{c-n})$	2.278	8.138
$\% \text{THD}_I(\text{c})$	3.577	85.971
$\text{PF}(\text{c-n})$	1.00	0.999
$\text{DPF}(\text{c-n})$	1.00	0.999
$I_{\text{rms}}(\text{Neutral}).. \text{A}$	0.45	63
$P_{3T} = P_{T1} + P_{T2} + P_{T3} \dots \text{W}$	9,435.2	9,358.4
$Q_{3T} = Q_{T1} + Q_{T2} \dots \text{Var}$	33.169	618.114
$S_{3T} = \sqrt{P_{3T}^2 + Q_{3T}^2} \dots \text{VA}$	9,435.30	9,378.79
$\Sigma \text{PF}_3 = \frac{\Sigma P_{3T}}{\Sigma S_{3T}}$	0.997	0.997

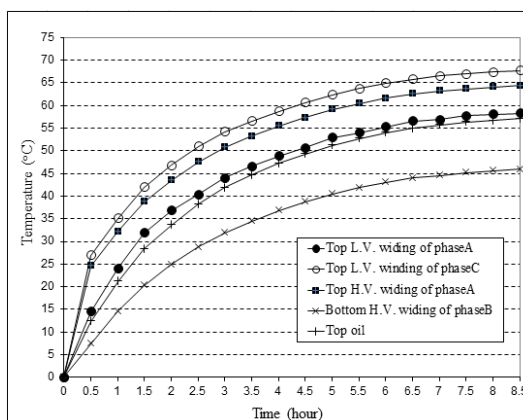
-เปรียบเทียบอุณหภูมิหม้อแปลง ที่วัดได้กรณีที่เป็น
โหลดเชิงเส้นกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

-จากรูปที่ 47 และรูปที่ 48 เป็นการคำนวณค่าอุณหภูมิ
เพิ่มของหม้อแปลงหาได้จากการนำค่าอุณหภูมิหม้อ
แปลงที่วัดได้ (จากรูปที่ 26 และรูปที่ 46) ลบออกจาก
อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยที่ติดตั้งตัวเทอร์โมคัปเปิลห่างจาก
ตัวหม้อแปลงระยะ 2 เมตร ที่ระดับความสูงครึ่งหนึ่ง
ของหม้อแปลง สังเกตได้ว่าค่าของอุณหภูมิที่ขดลวด
ทางด้านทุติยภูมิ (แรงดันต่ำ) ที่อยู่บริเวณด้านบนของ
เฟส C มีค่าสูงสุด ส่วนอุณหภูมิที่ขดลวดทางด้าน
ปฐมภูมิ (แรงดันสูง) ที่อยู่บริเวณด้านล่างของเฟส A มี
ค่าต่ำสุด สาเหตุเพราะการระบายความร้อนโดยอาศัย
การไหลของของเหลว ความร้อนจะลอยตัวจากด้านล่าง
ขึ้นสู่ด้านบน ทำให้บริเวณด้านล่างมีอุณหภูมิต่ำกว่า
ด้านบน ถ้าพิจารณาในส่วนของขดลวดปฐมภูมิและ
ขดลวดทุติยภูมิที่ออกแบบให้ขดลวดคล้องรอบแกน
เหล็กที่ระดับความสูงด้านบนเท่า ๆ กันนั้น ที่ขดลวด
ทุติยภูมิจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิขดลวดปฐมภูมิ

สาเหตุเพราะการระบายความร้อนของขดลวดที่อยู่ชั้นใน
ทำได้ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับขดลวดปฐมภูมิที่อยู่ชั้นนอก

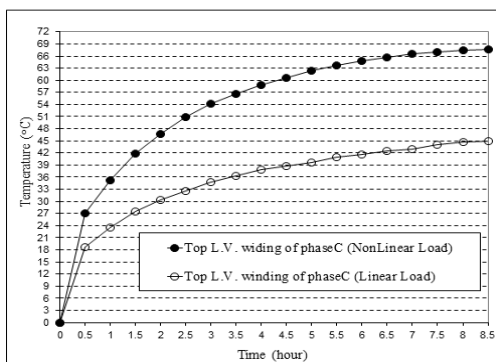


รูปที่ 47 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มที่จุดต่าง ๆ ของ
หม้อแปลงเมื่อใช้โหลดเชิงเส้น

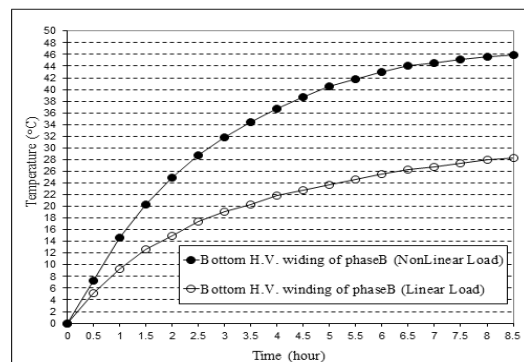


รูปที่ 48 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มที่จุดต่าง ๆ ของ
หม้อแปลงเมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

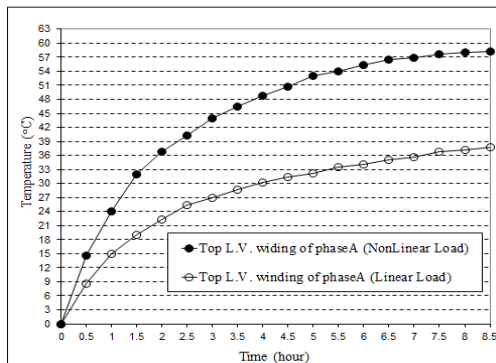
-จากรูปที่ 49 เห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ขดลวดทางด้าน
ทุติยภูมิ (แรงดันต่ำ) ที่อยู่บริเวณด้านบนของเฟส C กรณี
ที่เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่สภาวะคงตัวมีค่าสูงสุด
ประมาณ 68°C มากกว่ากรณีที่เป็นโหลดเชิงเส้นเท่ากับ
1.51 เท่าและรูปที่ 50 ถึง รูปที่ 52 ก็มีลักษณะคล้าย ๆ
กัน โดยค่าอุณหภูมิในกรณีที่เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมี
ค่ามากกว่า 1.52 เท่า 1.48 เท่า และ 1.64 เท่า เรียง
ตามลำดับ



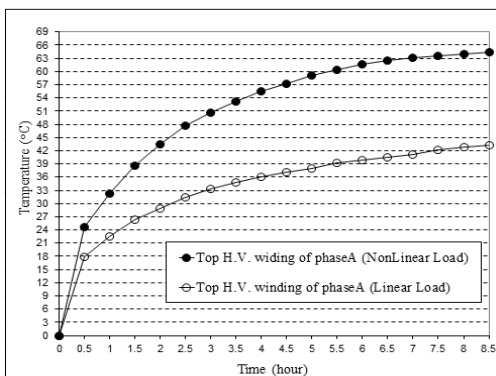
รูปที่ 49 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิด้านบนเฟส C เมื่อใช้โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 52 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิด้านล่างเฟส B เมื่อใช้โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

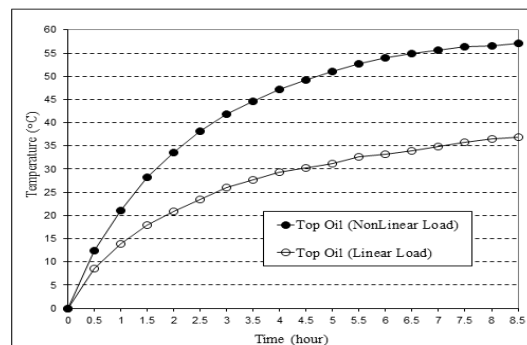


รูปที่ 50 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิด้านบนเฟส A เมื่อใช้โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 51 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ขดลวดปฐมภูมิด้านบนเฟส A เมื่อใช้โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

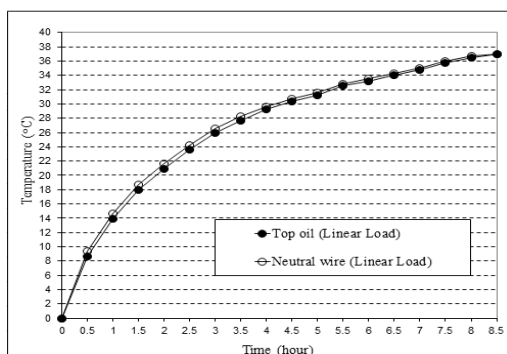
- จากรูปที่ 53 เห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบน กรณีที่เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่สภาวะคงตัวมีค่าสูงสุดประมาณ 57.5 °C มากกว่ากรณีที่เป็นโหลดเชิงเส้นเท่ากับ 1.55 เท่า ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีที่เป็นลวดตัวนำที่ผ่านมาข้างต้น



รูปที่ 53 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำมันด้านบน เมื่อใช้โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

- ในงานวิจัยได้ออกแบบให้ตัวนำสายนิวทรัลเป็นลวดทองแดงตามข้อแนะนำ [11] ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายเฟส (ทางด้านทุติยภูมิที่ 3.2 mm.) ต่อร่วมกับปลายสายของแต่ละเฟส (a, b, c) ดังรูปที่ 27 จากนั้นนำปลายสายอีก

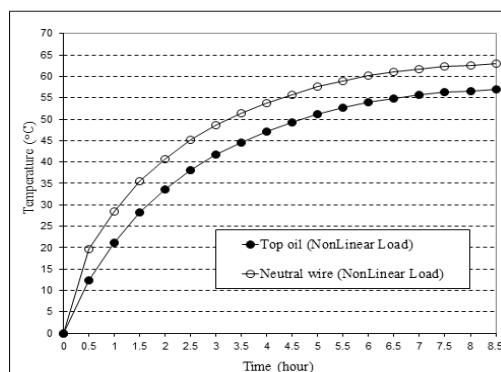
ด้านหนึ่งต่อไปยังขั้วต่อบุชซึ่งของหม้อแปลง เพื่อนำสายนิวทรีลต่อไปยังโหนดของแต่ละเฟส วิธีการทดสอบแบบนี้สายนิวทรีลที่ออกแบบจะอยู่ภายในถังหม้อแปลง โดยสายนิวทรีลนี้ได้ติดตั้งบริเวณด้านบนของขดลวดที่ระดับความสูงเดียวกับจุดที่มีการวัดอุณหภูมิน้ำมันรูปที่ 54 เห็นได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิเพิ่มของสายนิวทรีลใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง สาเหตุเนื่องจากการทดสอบนี้ใช้โหลดเชิงเส้นแบบสมดุล ทำให้กระแสสายนิวทรีลมีค่าเกือบศูนย์ ส่งผลให้ค่ากำลังสูญเสียที่สายนิวทรีล ($P_{Loss} = i^2 R_{copper}$) มีค่าน้อย และค่ากำลังสูญเสียนี้จะแปรเปลี่ยนเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีปริมาณน้อยตาม ค่าอุณหภูมิที่วัดได้โดยมากเกิดจากการส่งผ่านความร้อนโดยการพาจากจุดอื่น ๆ มายังจุดที่มีการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 54 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มที่สายนิวทรีลเทียบกับน้ำมันด้านบน เมื่อใช้โหลดเชิงเส้น

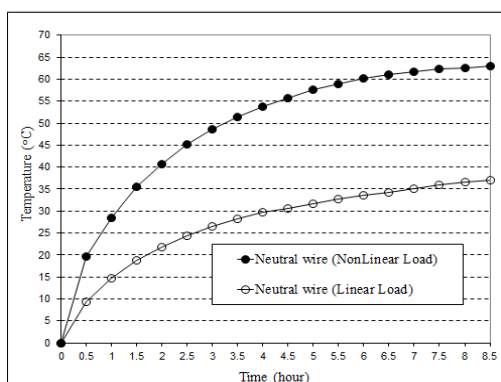
- จากรูปที่ 55 เห็นได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มของสายนิวทรีลจากการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าประมาณ 63°C มากกว่าอุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบน 1.11 เท่า สาเหตุเนื่องจากการทดสอบใช้โหลดประเภทนี้จะมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ที่สายนิวทรีลมีค่าสูง ซึ่งวัดได้มีค่าเท่ากับ 63A โดยที่กระแสนี้จะไหลที่ผิวของตัวนำ ผลมาจากการปรากฏการณ์ที่ผิว (Skin effect) ทำให้ค่าความต้านทาน

ของตัวนำในกรณีที่เป็นกระแสไฟฟ้าสลับมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังสูญเสียที่สายนิวทรีล ($P_{Loss} = i^2 R_{copper}$) มีค่ามากขึ้น และค่ากำลังสูญเสียนี้จะแปรเปลี่ยนเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีปริมาณสูงตามด้วย



รูปที่ 55 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มที่สายนิวทรีลเทียบกับน้ำมันด้านบน เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

- จากรูปที่ 56 เห็นได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มของสายนิวทรีลกรณีที่ใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าประมาณ 63°C มากกว่ากรณีใช้โหลดเชิงเส้นอุณหภูมิน้ำมันด้านบน 1.7 เท่า ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงที่ต้องรองรับกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 1 เฟส ดังเหมือนกับงานวิจัยนี้จะต้องคำนึงถึงขนาดของสายนิวทรีลที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะรองรับกับกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่สามที่มีปริมาณสูงได้ แนวทางการหลบหลีกกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่สามที่ไหลในสายนิวทรีลที่อยู่ภายในถังหม้อแปลงให้ย้ายไปไหลในสายนิวทรีลที่อยู่นอกถังหม้อแปลงแทน โดยการนำปลายสายของแต่ละเฟส (a, b, c) ย้ายไปต่อร่วมกันที่บริเวณขั้วต่อบุชซึ่งของหม้อแปลง จากนั้นต่อสายนิวทรีลที่ขั้วต่อบุชซึ่งไปยังโหนดแต่ละเฟสของหม้อแปลง



รูปที่ 56 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่สายนิวทรัล เมื่อใช้โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

4. สรุปผล

1. เมื่อพิจารณาที่จุดต่อร่วมของหม้อแปลงกับระบบ (PCC) ค่ากระแสประสิทธิผล $\%THD_1$ และกำลังไฟฟ้าจริงของหม้อแปลงกรณีที่ใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีค่าสูงกว่ากรณีที่เป็นโหลดเชิงเส้น จากการใช้สมการที่ 19 ถึง 21 กรณีที่เป็นหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันค่า P_{ECR} กำหนดไว้ 1% [12] ดังนั้น การลดพิสัยหม้อแปลง (Derating Transformer) ตัวที่ใช้ทดสอบนี้ให้สามารถรองรับกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ 97.6% ของพิสัยหม้อแปลง (9.76kVA) และขนาดของกระแสฮาร์มอนิกของแต่ละลำดับไม่เกินจากข้อกำหนด [13] และค่า $\%THDV$ มีค่า 1.94 ไม่เกินจากข้อกำหนด [13] ด้วยเช่นเดียวกัน

2. อุณหภูมิหม้อแปลงที่ตำแหน่งขดลวดด้านบนเป็นจุดที่มีค่าสูงสุด (Hottest-spot) ทั้งในกรณีที่โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งบริเวณนี้จะทำให้ฉนวนหม้อแปลงเสื่อมสภาพมากกว่าจุดอื่น ๆ ส่งผลเสียกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่ลดลง ดังนั้นการออกแบบหม้อแปลง ถ้าคำนึงถึงเรื่องการระบายความร้อนของหม้อแปลงให้เหมาะสม ก็จะช่วยยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงได้เป็นอย่างดี

3. ในการใช้งานหม้อแปลงที่ต้องรองรับกับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 1 เฟส ขนาดของสายนิวทรัลและขนาดของบุชซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงเป็นพิเศษ สาเหตุเพราะกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่สามที่ไหลในตัวนำมีปริมาณสูง (1.73 เท่าของกระแสสายทางด้านพุติยภูมิ) ทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นมากที่บริเวณลวดตัวนำ และอาจทำให้เกิดการอาร์คที่ข้อต่อของบุชซึ่ง [14] แต่ถ้าเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ จะมีการใช้ตัวเปลี่ยนแปลงแท็ปหม้อแปลง (Tap changer) ในการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า [15] ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่มีค่ามากนี้อาจทำให้เกิดความร้อนสูงที่บริเวณหน้าสัมผัสส่งผลทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้

ทิศทางการทำวิจัยครั้งต่อไป คณะผู้วิจัยจะมุ่งเน้นในเรื่องการเปรียบเทียบผลการทำนายเทียบกับการทดสอบของอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดในกรณีที่โหลดเป็นแบบไม่เชิงเส้นที่มีกระแสฮาร์มอนิกเลขที่สาม ถ้าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันจะเป็นผลดีในเรื่องของการวางแผนการจ่ายโหลดของหม้อแปลงเป็นอย่างมาก ส่งผลถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่มั่นคง เมื่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าดีทำให้ระบบการผลิตไม่หยุดชะงัก การผลิตเป็นไปตามแผนงานที่วางไว้ ทั้งในเรื่องของเวลาและงบประมาณค่าใช้จ่ายต่าง ๆ อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ANSI/IEEE C57.91-1981, IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65°C or 55°C average winding rise.
- [2] ANSI/IEEE C57.92-1981, IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted

- power transformers up to and including 100 MV A with 65°C or 55°C average winding rise.
- [3] ANSI/IEEE C57.115-1981. IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted power transformers rated in excess of 100 MVA 65°C winding rise.
- [4] IEC354 Loading guide for oil immersed power transformer, 1991.
- [5] Linden, W. P., “An Investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding,” *IEEE Transaction on Power Delivery* vol. 7, no. 3, pp.1347-1357, Jul. 1992.
- [6] S. Tadsuan, V. Kinnares, N. Kritsanajinda, S. Banjongjit, and B. Suechoey, “Testing of temperature at conductor and oil of mineral-oil-immersed transformer in order to be the criterion for transformer design,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 23, no.2, pp.59-77, May 2000. (in Thai)
- [7] D. Susa and H. Nordman, “A Simple model for calculating transformer hot-spot temperature,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 24, no.3, pp.1257-1264, Jul. 2009.
- [8] M. Srinivasan and A. Krishnan, “Effects of Environmental factors in transformer’s insulation life,” *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. 8, no.1, pp. 35-44, Jan. 2013.
- [9] S. Tadsuan, T. Tammaprasit, B. Suechoey, V. Kinnares, S. Banjongjit, “Testing of Temperature of Oil Immersed Transformer at Non-Linear Load,” in *Proc. 31st Electrical Engineering Conference (EECON-24)*, 22-23 Nov. 2001, pp. 118-123. (in Thai)
- [10] S. Tadsuan, V. Kinnares, N. Kritsanajinda, S. Banjongjit, and B. Suechoey, “Estimation of Core Loss of M4 and M5 Transformer Core Material under Sinusoidal and Non-Sinusoidal Voltage Excitation,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 27, no.1, pp.17-33, Jan. 2004. (in Thai)
- [11] IEC 60364-5-52. Electrical installations of buildings –Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment –Wiring systems Second edition, 2001.
- [12] IEEE Std C57.110. IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-sinusoidal Load Currents, 1998.
- [13] Engineering Recommendation G5/3. Limits for Harmonics in The United Kingdom Electricity Supply System, 1976.
- [14] T. Teja, S. Tadsuan and S. Tapeantong, “A development of temperature monitoring device for studying heat at terminal junction of 1-phase oil immersed distribution transformers of PEA,” *SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY*, vol. 3, no. 1, pp.15-32, Jan. 2017. (in Thai)
- [15] M. Djamali, S. Tenbohlen, “A Dynamic Top Oil Temperature Model for Power Transformers with Consideration of the Tap Changer Position,” In *Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering*, Pilsen, Czech Republic, 23 –28 August 2015.

ประวัติผู้ประพันธ์

**ประสิทธิ์ สุขเสริม**

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี
(ค.บ.ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร
เหนือ และปริญญาโท (ค.อ.ม.

ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร
เหนือ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำ
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

งานวิจัยที่สนใจ : เครื่องจักรกลไฟฟ้า การออกแบบ
ระบบส่องสว่าง ระบบควบคุม

**สิริวิษ ทัดสวน**

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท
(วศ.ม. ไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง ปัจจุบันดำรง

ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า

งานวิจัยที่สนใจ : คุณภาพไฟฟ้า การศึกษากำลังไฟฟ้า
สูญเสียและความร้อนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า การ
ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับเครื่องจักรกล
ไฟฟ้าและการควบคุม ติดตามและป้องกันเครื่องจักรไฟฟ้า
ด้วยระบบ Internet of Thing (IOT)