บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้า [1]

2.1.1 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง โดยวิธีทางวงจรแม่เหล็กซึ่งไม่มีจุดต่อไฟฟ้าถึงกันและไม่มีชิ้นส่วนทางกลเคลื่อนที่ โดยทั่วไปเราใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มีขนาดลดลงหรือ เพิ่มขึ้นจากเดิม โดยมีความถี่ไฟฟ้าคงเดิม

ภาพที่ 2.1 หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส และ 3 เฟส

2.1.2 โครงสร้าง [2]

หม้อแปลงแบ่งออกตามการใช้งานของระบบไฟฟ้ากำลังได้ 2 แบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 1 เฟส และหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส แต่ละชนิดมีโครงสร้างสำคัญประกอบด้วย

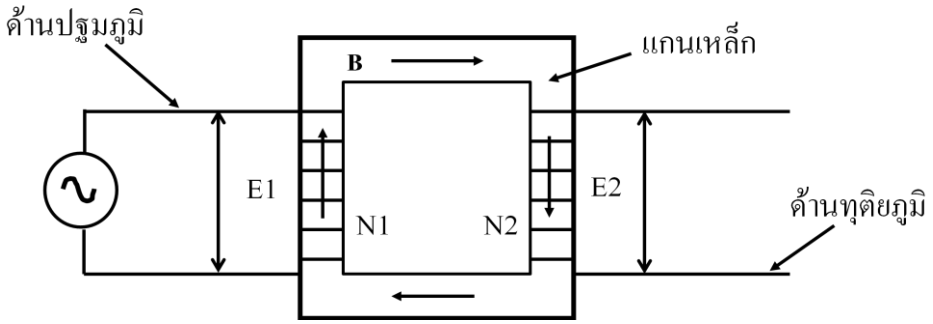
- ขดลวดตัวนำปฐมภูมิ (Primary Winding) ทำหน้าที่รับแรงเคลื่อนไฟฟ้า
- ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) ทำหน้าที่จ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า
- แผ่นแกนเหล็ก (Core) ทำหน้าที่เป็นทางเดินสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และให้ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก
- ขั้วต่อสายไฟ (Terminal) ทำหน้าที่เป็นจุดต่อสายไฟกับขดลวด
- แผ่นป้าย (Name Plate) ทำหน้าที่บอกรายละเอียดประจำตัวหม้อแปลง
- อุปกรณ์ระบายความร้อน (Coolant) ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับขดลวด เช่น อากาศ, พัดลม, น้ำมัน หรือใช้ทั้งพัดลมและน้ำมันช่วยระบายความร้อน เป็นต้น
- โครง (Frame) หรือตัวถังของหม้อแปลง (Tank) ทำหน้าที่บรรจุขดลวด แกนเหล็กรวมทั้งการติดตั้งระบบระบายความร้อนให้กับหม้อแปลงขนาดใหญ่
- สวิตช์และอุปกรณ์ควบคุม (Switch Controller) ทำหน้าที่ควบคุมการเปลี่ยนขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และมีอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างภายในของหม้อแปลง

2.1.3 หลักการทำงาน

กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) กล่าวไว้ว่า เมื่อขดลวดได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้ขดลวดมีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กตามขนาดของรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ และทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดนี้

คำอธิบาย : เมื่อขดลวดปฐมภูมิได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นตามกฎของฟาราเดย์ ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ขึ้นอยู่กับ จำนวนรอบของขดลวด พื้นที่แกนเหล็ก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดจะทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กนี้เปลี่ยนแปลงตามขนาดของรูปคลื่นไฟ ฟ้าที่ได้รับ เส้นแรงแม่เหล็กเกือบทั้งหมดจะอยู่รอบแกนเหล็ก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กผ่านขดลวด จะทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมินี้



ภาพที่ 2.3 การเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า

สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้า คือ

$$E_1 = 4.44 \times N_1 \times f \times B \times A \quad (2.1)$$

$$E_2 = 4.44 \times N_2 \times f \times B \times A \quad (2.2)$$

เมื่อ E คือ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

f คือ ความถี่

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

2.1.4 ชนิดของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้ากำลัง [1]

ชนิดของ หม้อแปลงอาจแบ่งได้หลายวิธี เช่น แบ่งตาม โครงสร้าง แบ่งตามตัวกลางที่ใช้เป็นฉนวนและตัวระบายความร้อน แบ่งตามขนาด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

แบ่งตามโครงสร้างออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

- แบบ Core Type ซึ่งประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆมาเรียงติดกันเป็นแท่ง ส่วนขดลวดจะพันทับขาของแกนเหล็กโดย ขดลวดปฐมภูมิ และ ขดลวดทุติยภูมิ แยกไว้คนละขาของแกนเหล็ก สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว ส่วนหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ จะพันคนละชุดสวมอยู่ในแกนเดียวกัน โดยขดลวดปฐมภูมิอยู่ด้านนอกส่วนขดลวดทุติยภูมิอยู่ด้านใน ดังนั้นแกนเหล็กแบบนี้จึงเรียกว่าเป็นแบบขดลวดหุ้มแกน สำหรับหม้อแปลงเฟสเดียวมีขาแกนเหล็ก 2 ขา ส่วนหม้อแปลง 3 เฟสจะมีแกนเหล็ก 3 ขา
- แบบ Shell Type ลักษณะของแกนเหล็กแบบนี้จะประกอบด้วยเหล็กบางๆ 2 ส่วน คือรูปตัว E และตัว I นำมาเรียงติดกันเป็นแท่ง ขดลวดปฐมภูมิ และ ทุติยภูมิ จะพันทับกันบนขากลางของแกนเหล็ก จึงเรียกแกนเหล็กแบบนี้ว่าชนิดแกนหุ้มขดลวด โดยหม้อแปลง เฟสเดียวมีขาแกนเหล็ก 3 ขา และหม้อแปลง 3 เฟส มีขาแกนเหล็ก 5 ขา

แบ่งตามตัวกลางที่ใช้เป็นฉนวนและตัวระบายความร้อนออกเป็น 2 ชนิด คือ

- แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Dry Type) ซึ่งใช้อากาศเป็นฉนวนระบายความร้อนแทนน้ำมัน ปัจจุบันมีใช้ 2 แบบ คือ
  - แบบ Air Ventilated หม้อแปลงแบบนี้ขดลวดจะสัมผัสกับอากาศโดยตรง หม้อแปลงชนิดนี้เมื่อพันขดลวดทั้งด้านปฐมภูมิ และ ด้านทุติยภูมิ เสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำไปเคลือบฉนวนเช่น วานิช แล้วอบให้ปราศจากความชื้น ประกอบกับแกนเหล็กให้สมบูรณ์ไม่ต้องใส่ถังหม้อแปลง โดยเมื่อใช้งานจะนำไปประกอบอยู่ในตู้
  - แบบ Cast Resin หม้อแปลงชนิดนี้จะทำการหล่อโดยใช้ฉนวนจำพวก Epoxy Resin หุ้มขดลวดปฐมภูมิ และ ทุติยภูมิด้วยระบบสุญญากาศ เพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้นใน Epoxy Resin เพื่อป้องกันการปล่อยประจุผ่านฟองอากาศทำให้เกิดความเสียหายแก่หม้อแปลงได้ หม้อแปลงชนิดนี้จะทนต่อสภาพความชื้นได้ดีกว่า แบบ Air Ventilated แต่การระบายความร้อนจากขดลวดสู่ฉนวน Epoxy Resin และระบายออกสู่อากาศต้องใช้เทคนิคสูงกว่าชนิดแรก
- แบบขดลวดจุ่มในน้ำมัน (Oil Immerse) ซึ่งใช้ของเหลวเป็นฉนวน และ ระบายความร้อน

แบ่งตามขนาดได้ 3 ชนิด คือ

- หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (Power Transformer) เป็นหม้อแปลงขนาดใหญ่ที่มีการติดตั้งตามสถานีต้นทาง สถานีย่อยของการไฟฟ้า บริษัทผลิตไฟฟ้าเอกชน หรือสถานีจ่ายไฟของโรงงานอุตสาหกรรม ขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่ โดยทั่วไปมีขนาด 1 MVA จนถึงหลายร้อย MVA

- หม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformer) เป็นหม้อแปลงขนาดกลางที่ ใช้ในระบบ ของการจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง ติดตั้งบนเสาไฟฟ้า นั่งร้าน หรือวางบนพื้น โดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 1 kVA – 20 MVA

- หม้อแปลงเพื่อการวัด (Instrument Transformer) เป็นหม้อแปลงสำหรับวัดค่าแรงดัน หรือกระแสไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟสูงๆ ซึ่งไม่สามารถใช้โวลท์มิเตอร์หรือแอมป์มิเตอร์วัดได้โดยตรง เพราะอาจทำให้เครื่องมือวัดและบุคคลที่เข้าไปเกี่ยวข้องได้รับอันตราย

2.2 การบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า [1]

การบำรุงรักษาส่วนใหญ่มีจุดมุ่งหมายเพื่อ รักษาอุปกรณ์ ให้อยู่ในสภาพใหม่ และปลอดภัย อยู่เสมอ ซึ่งการกระทำเช่นนั้นอาจไม่เหมาะสมเมื่อคิดในแง่เศรษฐศาสตร์ เช่น ราคาในการบำรุงรักษาสูงเกินไป เมื่อเทียบกับมูลค่าของอุปกรณ์ หรือความเสี่ยงเมื่อเกิดความเสียหาย ดังนั้นการกำหนดตารางในการบำรุงรักษาจึงต้องคำนึงถึงหลายองค์ประกอบ ทั้งทางด้านวิศวก รรมศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- ความสำคัญของอุปกรณ์ที่มีต่อระบบ ประเมินเป็นมูลค่าของความเสียหาย

- สภาพของการใช้งานนั้นเสี่ยงต่อความเสื่อมของอุปกรณ์หรือไม่ เช่น หม้อแปลงมีความจำเป็นต้องจ่ายโหลดเกินพิกัดบ่อยครั้ง หรือมีการที่ป้องกันที่ไม่ดีนัก ต้องทำการตรวจสอบบ่อยขึ้น

- สภาพแวดล้อมของสถานที่ติดตั้ง เช่น ร้อนจัด มีฝุ่นมาก มีสารเคมีแพร่กระจายอยู่ในอากาศ ต้องมีการปรับระยะเวลาในการตรวจสอบให้เหมาะสม

2.3 การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าถือเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยจะมีการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อให้หม้อแปลงไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติและยังทำให้หม้ อแปลงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานที่ นานขึ้น ซึ่งในระบบฉนวนภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบด้วย ฉนวนน้ำมัน กระดาษ ซีลยาง ฉนวนทองแดง โดยวัสดุเ หล่านี้จะมีการเสื่อมสภาพเมื่อมีความชื้น เขม่า หรือสิ่งเจือปนอื่นๆ และก๊าซปะปนอยู่ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการ ลัดวงจร หรือระเบิดได้ ดังนั้นจึงควรทำการตรวจสอบสภาพ และบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเป็นการลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น อีกทั้งยังทำให้ได้ประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบไฟฟ้า จึงต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ โดยทั่วไปจะมีการตรวจสอบทุกๆ 6 เดือน หรือ 1 ปี เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานขอหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้ามักจะใช้การตรวจวัดทางไฟฟ้า และ การตรวจวัดทางน้ำมัน ในการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

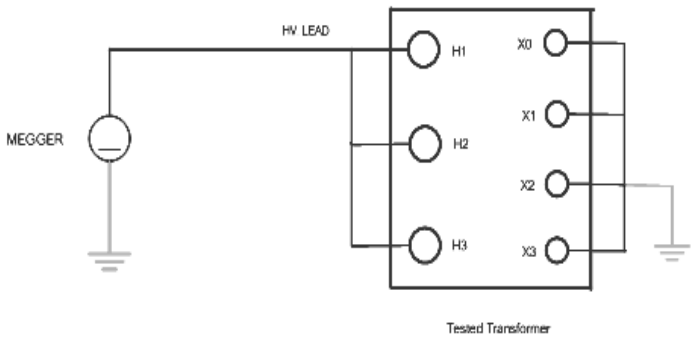
2.4 การตรวจวัดทางไฟฟ้า [3]

2.4.1 การวัดค่าความต้านทานของฉนวน (Insulation Resistance Measurement)

สำหรับการทดสอบค่าความต้านทาน ของฉนวน เพื่อตรวจสอบแนวโน้มของ การเสื่อมสภาพของฉนวน ที่เกิดขึ้น ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนในการทดสอบ เป็นวิธีการ ลัดวงจรของขดลวดในแต่ละชุดของหม้อแปลงเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะให้แรงดันทดสอบมีค่าเท่ากันในแต่ละเฟส ถ้าขดลวดทดสอบมีพิกัดแรงดันตั้งแต่ 3,300 V ขึ้นไปให้ทดสอบด้วยแรงดัน 2,500 Vdc และถ้าพิกัดแรงดันน้อยกว่า 3,300 V ลงมาให้ทดสอบด้วยแรงดัน 1,000 Vdc จากนั้นทดสอบตั้งแต่ 1 นาที ถึง 10 นาที แล้วคำนวณค่า Polarization Index (PI) หรือค่าอัตราส่วนความต้านทานฉนวนที่นาทีที่ 10 ต่อนาทีที่ 1 ตามมาตรฐาน IEEE C57.125-1999

ตารางที่ 2.1 ค่า PI ในการพิจารณาสภาพของหม้อแปลงฟ้า

สภาพ	PI
ดี	มากกว่า 2.0
พอใช้	1.25 – 2.0
อาจเกิดความผิดปกติ	1.1 – 1.25
อันตราย	น้อยกว่า 1.1



ภาพที่ 2.4 วงจรวัดค่าความต้านทานฉนวน

2.4.2 การวัดค่าความสูญเสียทางฉนวน (Insulation Power – Factor Measurement)

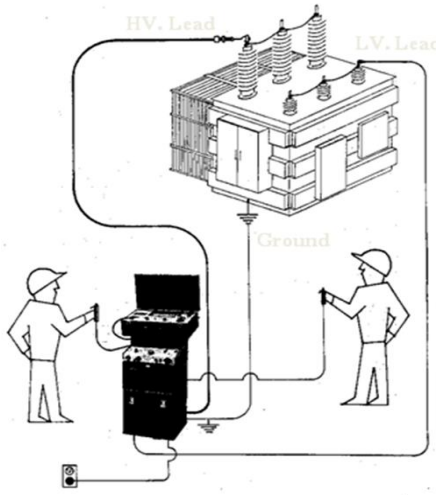
สำหรับการวัดค่าความสูญเสียทางฉนวนจะทำการทดสอบเพื่อตรวจหาการย่อยสลายของฉนวนที่มักเกิดจาก ความชื้นหรือคาร์บอนที่ปนเปื้อนอยู่ ซึ่งจะบอกถึงการเสื่อมสภาพของฉนวน บูทชิ่งและขดลวด ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการวัดค่าความต้านทานของฉนวน ซึ่งจะบอกถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเป็น ทดสอบเพื่อวัดค่าการสูญเสียในฉนวน (Dielectric Loss) โดยผลที่วัดได้จะเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังงานที่สูญเสียไปในฉนวนกับผลคูณของแรงดันและกระแสที่จ่ายให้กับหม้อแปลงนั้น จุดประสงค์เพื่อหาการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า โดยถ้าค่าความต้านทานของฉนวนอยู่ในสภาพอันตรายก็ไม่ต้องทดสอบค่าความสูญเสียและ %PF แต่ถ้าค่าความต้านทานของ ฉนวนอยู่ระหว่าง 1.1 – 1.15 ให้ทำการทดสอบค่าความสูญเสียและ %PF ที่แรงดัน 2.5 kV ก่อนแล้วจึงทำการทดสอบตาม Data Test ที่แนบมากับหม้อแปลงไฟฟ้า โดยต้องบันทึกอุณหภูมิของน้ำมัน อากาศ และความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ 2.2 ระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ

แรงดันที่พิกัดของขดลวด (kV)	แรงดันที่ใช้ในการทดสอบ (kV)
3 -5	2.5
5 – 10	5
> 10	10

ตารางที่ 2.3 ค่าสภาพของฉนวน (%PF) ที่ 20 องศาเซลเซียส

ชนิด	สภาพดี (%PF)	น่าสงสัย (%PF)	อันตราย (%PF)
Power Tx	< 0.5	0.5 – 1.0	> 1.0
Dist Tx	< 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
DRY - Type	< 2.0	2.0 – 5.0	> 5.0
ASKAREL	< 0.5	0.5 – 10.0	> 10.0



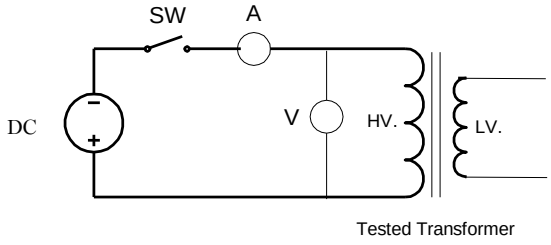
Artist's Drawing Showing Doble Test on a Three-Phase Two-Winding Power Transformer

FIGURE 3

ภาพที่ 2.5 วงจรวัดค่าสภาพของฉนวน (%PF)

2.4.3 การวัดค่าความต้านทานของขดลวด (Winding Resistance Measurement)

เป็นการวัดความต้านทานของขดลวดแต่ละขด เพื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ระหว่างเฟสว่ามีขดลวดใดผิดปกติหรือไม่ สำหรับการทดสอบ กระแสที่ทดสอบไม่ควรเกิน 15% ของกระแสพิกัดของหม้อแปลง โดยการสับสวิทช์และรอจนกว่า โวลท์มิเตอร์ และ แอมป์มิเตอร์ จะหยุดนิ่ง (Steady State) ทำการอ่านค่ากระแสและแรงดันพร้อมกัน โดยโวลท์มิเตอร์ ที่ใช้ควรมีค่าความต้านทาน สูงเมื่อเทียบกับขดลวดทดสอบ ในกรณีที่โวลท์มิเตอร์ที่ใช้วัดมีค่าความต้านทาน ยังไม่สูงพอเมื่อเทียบกับขดลวดทดสอบ ซึ่งทำให้ไม่สามารถอ่านค่ากระแสที่ถูกต้องของขดลวดได้ ก็ให้อ่านค่าแรงดันก่อนแล้วปลดโวลท์มิเตอร์ออก หลังจากนั้นจึงอ่านค่ากระแส บันทึกค่าอุณหภูมิของขดลวด และน้ำมันระหว่างการทดสอบสำหรับฉนวน (Dry Type) ในกรณีที่ปลดหม้อแปลงออกจากระบบนานเกิน 8 ชั่วโมง ให้ใช้อุณหภูมิของอากาศแทนอุณหภูมิของขดลวดได้ ความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้ไม่ควรเกิน 5 % (IEEE Std . 62-1995) เมื่อเทียบกับค่าทดสอบจากโรงงาน (Factory Test) ที่อุณหภูมิเดียวกัน และใช้เทียบกันระหว่างเฟส



ภาพที่ 2.6 วงจรการวัดค่าความต้านทานของขดลวด

2.4.4 การวัดค่าของกระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูง (High Voltage Exciting Current Measurement)

การวัดค่ากระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูงเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบสภาพของขดลวดว่ามีการลัดวงจร ระหว่างขดลวดหรือไม่ ซึ่งการทดสอบจะใช้เครื่องวัด %PF โดยทำการวัดค่ากระแสกระตุ้นด้วยแรงดันสูงที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงด้านเดียว โดยวัดที่ชุดของขดลวดแรงดันสูงสุด (ในกรณีบำรุงรักษาให้วัดที่ชุดของขดลวดที่ ใช้งาน โดยไม่ต้องเลื่อน ชุดของขดลวดตามมาตรฐาน NETA MTS-05)

ตารางที่ 2.4 ค่ากระแสกระตุ้นวงจรด้านแรงสูง

สภาพ	ปริมาณกระแสกระตุ้น (mA)
ดี	< 50
น่าสงสัย	≥ 50 and < 100
อันตราย	≥ 100

2.4.5 การวัดค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็ก (Core Insulation Resistance)

การวัดค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็กเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบฉนวน ระหว่างแกนเหล็กกับตัวถังของหม้อแปลง ว่าเกิดการชำรุด หรือเสื่อมสภาพ หรือไม่ สำหรับวิธีการวัดค่าความต้านทานของแกนเหล็กจะใช้แรงดันในการทดสอบไม่เกิน 1,000 Volt โดยมีขั้นตอนในการทดสอบ คือการหาตำแหน่งของจุดต่อสายดินของแกนเหล็กให้พบ ซึ่งหม้อแปลง ไฟฟ้าสมัยใหม่จะมีจุดต่ อสายดินจะต่อภายในออกมาที่บูทชิ่ งขนาดเล็กที่ตัวหม้อแปลง แล้วทำการปลดสายที่ต่อจา กจุดต่อสายดินของแกนเหล็กลงตัวถังของหม้อแปลง หรือต่อลงดินแล้วทำการวัดค่าฉนวนของแกนเหล็กเทียบกับก กกราวด์ โดยพิจารณาค่าความต้า นทานฉนวนแกนเหล็กเทียบกับกราวด์ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ ดังนี้

ตารางที่ 2. 5 ระดับค่าความต้านทานฉนวนแกนเหล็ก

ลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้า	ค่าความต้านทานของแกนเหล็ก	การประเมินสภาพ
หม้อแปลงใหม่	> 100 MΩ	ปกติ
หม้อแปลงที่ผ่านการใช้งานในระบบ	> 100 MΩ	ปกติ
	10 – 100 MΩ	แสดงการเสื่อมของฉนวน
	< 10 MΩ	ฉนวนเสื่อมสภาพทำให้เกิดกระแสไหลวน

2.4.6 การวัดค่าอัตราส่วนของขดลวด (Winding Ratio Measurement)

การวัดค่าอัตราส่วนของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิว่ามีอัตราจำนวนรอบตามที่กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งอัตราส่วนของขดลวดอาจเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากหลายปัจจัย รวมถึงความเสียหายทางกายภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า และความผิดปกติของฉนวนที่เสื่อมสภาพ โดยหากอัตราส่วนของขดลวดเปลี่ยนแปลงไปเกิน 0.5% อาจส่งผลต่อระดับของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการวัดค่าอัตราส่วนของขดลวดเป็นการทดสอบด้วยวิธี Volt Meter Method (มีเครื่องมือเป็นชุดสำหรับทดสอบอัตราส่วนซึ่งสามารถอ่านค่าได้เลย สำหรับที่นิยมใช้คือเครื่อง Multi-amp TR#800) สำหรับการทดสอบให้พิจารณาความเหมาะสมของแรงดันโดยใช้แรงดันไม่เกิน 80% ของพิกัดแรงดันหม้อแปลง ซึ่งจะทำการวัดในทุกชุดของขดลวดและทุกเฟสของหม้อแปลง โดยการหาค่าอัตราส่วนให้นำค่าแรงดัน L-L ไปหาค่าอัตราส่วนของขดลวด และในกรณีที่ต้องใช้ค่าแรงดัน L-N การคำนวณหาค่าอัตราส่วน คำนวณได้จากสูตร

$$Line\ to\ Neutral\ Voltage\ =\ \frac{Line\ to\ Line\ Voltage}{1.732} \tag{2.3}$$

หมายเหตุ ค่าอัตราส่วนของขดลวดกำหนดให้เป็นทศนิยม 4 ตำแหน่ง

สำหรับการหาค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนของขดลวด คำนวณได้จากสูตร

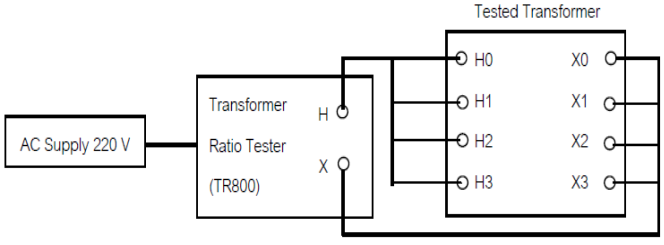
$$\%\ Error\ =\ \frac{R_m\ -R_r}{R_r} \times 100 \tag{2.4}$$

กำหนดให้ $\%\ Error$ = ความคลาดเคลื่อนของอัตราส่วนขดลวด

R_m = อัตราส่วนของขดลวดที่วัดได้

R_r = อัตราส่วนของขดลวดจาก Name Plate

โดย ค่าความคลาดเคลื่อนที่วัดได้ต้องไม่เกิน 0.5% เมื่อเทียบกับอัตราส่วนจาก Name Plate ตามมาตรฐาน ANSI C57.12.90-1973



ภาพที่ 2.7 วงจรการวัดค่าอัตราส่วนของขดลวด

2.5 การตรวจวัดทางน้ำมัน [4]

2.5.1 การวัดความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ (Dielectric Breakdown Strength)

กระแสสลับ (AC Breakdown Strength) ของน้ำมัน เป็นการวัดความสามารถของน้ำมันในการคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้ากระแสสลับ โดยปราศจากการเกิดความเสียหายตามมาตรฐาน ASTM D877, D1816 หรือ IEC156 ค่าความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์จะบอกให้ทราบถึงสิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำมันในรูปของสิ่งสกปรก (Contamination) เช่น เศษเส้นใยข องฉนวนแข็ง เศษตัวนำ (Conductive particles) น้ำ ฝุ่นละออง หรือความสกปรกต่างๆ น้ำมันที่มีความสกปรกปนอยู่มากจะมีค่า Breakdown ต่ำ น้ำมันที่สะอาดหรือผ่านการกรองมาใหม่ๆ จะมีค่า Breakdown สูง ปกติจะทำการทดสอบทุก 6 เดือน สำหรับหม้อแปลงที่มีความสำคัญมาก และจะทำก ารทดสอบทุก 1 ปี สำหรับหม้อแปลงปกติ ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM D877-87 หรือ D1816 , IEC156 กำหนดว่าไม่ควรต่ำกว่า 26 kV จึงจะถือว่าพอใช้งานต่อไปได้อย่างปลอดภัย

ค่าแรงดันเบรกดาวน์ขั้นต่ำของน้ำ มันหม้อแปลงไฟฟ้าตามข้อกำหนด ตามมาตรฐาน ASTM D877–87 สามารถแบ่งสภาพของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังนี้

ตารางที่ 2.6 ค่าแรงดันเบรกดาวน์

Dielectric Breakdown Voltage at 50 Hz [kV]	ระดับแรงดันไฟฟ้า	Good
มาตรฐาน ASTM D877	<= 69 kV	> 26
	69 – 288 kV	> 26
	> 345 kV	> 26
มาตรฐาน IEEE c57.106	<= 69 kV	> 30
	69 – 288 kV	> 30
	> 345 kV	> 30
มาตรฐาน IEC 60156	< 72.5 kV	> 40
	72.5 – 170 kV	> 50
	> 170 kV	> 60

2.5.2 การวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง (Dissolved Gas Analysis)

การวิเคราะห์ก๊าซ (Dissolved Gas Analysis) ที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลงเป็นการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในสภาวะวิกฤต เพื่อเฝ้าติดตามการทำงานทางกลและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวินิจฉัยความผิดปกติและปัญหาที่เกิดจากการใช้งานกับหม้อแปลงไฟฟ้าและตัวเปลี่ยนชุดขดลวด หรืออุปกรณ์ชนิดฉนวนน้ำมันถูกใช้งานภายใต้สภาวะความร้อนและความเครียดทางสนามไฟฟ้าสูงๆ อาจจะมีโอกาสทำให้ เกิดความผิดปกติขึ้นได้ในที่สุด ความผิดปกติอาจจำแนกได้ 3 ประเภทด้วยกันคือ

- การเกิดเบรกดาวน์บางส่วน
- การเกิดความร้อนสูง
- การเกิดอาร์ก

พลังงานที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะเป็นผลทำให้เกิดความผิด ปกติขึ้น และเป็นสาเหตุทำให้น้ำมันเกิดเบรกดาวน์ ผลของการเบรกดาวน์หรือที่เรียกว่าก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน ทำให้เกิดการปนเปื้อน ซึ่งสามารถทำการตรวจวัดเพื่อหาชนิดและความรุนแรงของความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ การวิเคราะ ห์น้ำมันหม้อแปลงจากการเกิดก๊าซเจือปนในน้ำมัน ทำให้เราสามารถตรวจวัดความผิดปกติที่เริ่มเกิดได้ก่อนที่จะเกิดความเสียหาย กับหม้อแปลง ไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่การเกิดไฟดับและความสูญเสียอีกหลายอย่างตามมา

ในการตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เจือปนในน้ำมันหม้อแปลง ด้วยเครื่อง MYRKOS Transformer Fault Gas Analyzer ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้มีความถูกต้องแม่นยำ สำหรับการตรวจวัดก๊าซทั้ง 7 ชนิดซึ่งเกิดจากความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดฉนวนด้วยน้ำมันได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2) , คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) , คาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) , มีเทน (CH_4) , อีเทน (C_2H_6) , เอทิลีน ($C_2 H_4$) ,อะเซทิลีน ($C_2 H_2$)

Fault Gas ก๊าซที่เกิดขึ้นในน้ำมันหม้อแปลงและเป็นที่ยอมรับ กันโดยทั่วไป สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ชนิดของการเกิดความผิดปกติภายในหม้อแปลงไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ก๊าซที่เจือปนในน้ำมัน

ก๊าซที่ตรวจสอบพบ	ความหมาย
ก๊าซ N_2 +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	หม้อแปลงไฟฟ้าใช้งานโหลดเกินหรือเกิดความร้อนในการทำงาน สาเหตุ เนื่องจากเกิดเบรกดาวน์ในกระดาษฉนวน ให้ตรวจสอบเงื่อนไขการใช้งาน
ก๊าซ N_2 และ H_2	เกิดดิสชาร์จบางส่วน เกิดแยกน้ำเป็นออกซิเจนหรือเกิดสนิม
ก๊าซ N_2, H_2, CO_2 และ CO	เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นภายในกระดาษฉนวนหรือเกิดจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเกินโหลด
ก๊าซ N_2, H_2, CH_4 และเกิดปริมาณก๊าซ C_2H_6 และ C_2H_4 เล็กน้อย	สปาร์คหรือเกิดความผิดปกติ เนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ภายในน้ำมันหม้อแปลง
ก๊าซ N_2 ร่วมกับ H_2 ปริมาณสูงและมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น C_2H_2 เล็กน้อย	เกิดอาร์กชนิดที่มีพลังงานสูงมาก สาเหตุเนื่องจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันอย่างรวดเร็ว
ก๊าซ N_2 ร่วมกับ H_2 ปริมาณสูง , CH_4และ C_2H_4 ในปริมาณสูงและมี C_2H_2 เล็กน้อย	เกิดอาร์กในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงภายในบริเวณแคบๆ ตัวอย่างเช่น เกิดลัดวงจรระหว่างรอบขดลวด
มีปริมาณก๊าซเหมือนข้างบน แต่มี CO_2 และ CO เกิดร่วมอยู่ด้วย	เกิดอาร์กในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงภายในบริเวณแคบๆ ของกระดาษฉนวน

การวินิจฉัยหม้อแปลงไฟฟ้าโดยใช้ค่าของก๊าซที่ลายอยู่ในน้ำมัน คู่มือใช้ในการจำแนกความเสี่ยงที่อาจเป็นไปได้โดยใช้ DGA เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่อาจจะเกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE C-57-104-1991 ซึ่งจะดูจากค่าก๊าซแต่ละชนิดและ ก๊าซที่เผาไหม้ทั้งหมดเพื่อ ใช้ในการประเมินหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจะมีอยู่ 4 เงื่อนไข คือ

ตารางที่ 2.8 ขีดจำกัดของก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลงส่วนในล้านส่วน (ppm)

Status	Dissolved key gas concentration limits [μL/L (ppm)[a]]							
	Hydrogen (H_2)	Methane (CH_4)	Acetylene (C_2H_2)	Ethylene (C_2H_4)	Ethane (C_2H_6)	Carbon monoxide (CO)	Carbon dioxide (CO_2)	TDCG[b]
Condition 1	100	120	1	50	65	350	2 500	720
Condition 2	101–700	121–400	2–9	51–100	66–100	351–570	2 500–4 000	721–1920
Condition 3	701–1800	401–1000	10–35	101–200	101–150	571–1400	4 001–10 000	1921–4630
Condition 4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10 000	>4630

หมายเหตุ TDCG คือ ก๊าซที่สามารถติดไฟได้ (Total Dissolved Combustible Gas)

เงื่อนไข 1 ก๊าซที่สามรถติดไฟได้เจือปนอยู่ในน้ำมันมีปริมาณต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ แสดงว่าหม้อแปลงไฟฟ้าทำงานอยู่ในเกณฑ์ปกติ แต่ถ้าก๊าซที่สามารถติดไฟเจือปนอยู่ในน้ำมันเกินระ ดับที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.8 ควรทำการตรวจสอบเพิ่มเติม

เงื่อนไข 2 ก๊าซที่สามารถติดไฟได้เจือปนอยู่ในน้ำมันอยู่ในช่วงนี้ แสดงว่ามีระดับของก๊าซที่สามารถติดไฟได้เจือปนอยู่ในน้ำมันเพิ่มขึ้นมากกว่าระดับปกติ ซึ่งเกินกว่าที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.8 ควรทำการตรวจสอบเพิ่มเติม ซึ่งความผิดปกติอาจสามารถตรวจพบจากการทดสอบหาก๊าซที่เจือปนอยู่ในน้ำมัน เพื่อคำนวณหาปริมาณของก๊าซที่เพิ่มขึ้น

เงื่อนไข 3 ก๊าซที่สามารถติดไฟได้ เจือปนอยู่ในน้ำมันอยู่ในช่วงนี้ แสดงถึงการสลาย ตัวของฉนวนกระดาษหรือน้ำมันที่มีระดับสูง ถ้าก๊าซบางชนิดมีปริมาณสูงกว่าที่กำหนดไว้ แสดงว่าอาจเกิดความผิดปกติขึ้นแล้ว ดังนั้น จึงควรจะทำการตรวจสอบบ่อยขึ้น เพื่อทำการคำนวณหาปริมาณของก๊าซแต่ละชนิดที่เพิ่มขึ้น

เงื่อนไข 4 ก๊าซที่สามารถติดไฟได้เจือปนอยู่ในน้ำมันอยู่ในช่วงนี้ แสดงถึงการสลายตัวของฉนวนกระดาษหรือน้ำมันที่มากเกินไป ควรทำการซ่อมบำรุงทันที หากใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าต่อไปอาจทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้

2.5.3 การตรวจวัดความชื้น (Water Content test)

เป็นการตรวจเพื่อหาความชื้นหรือน้ำที่ปะปนอยู่ภายในน้ำมันหม้อแปลง จะทำการตรวจวัดโดยวิธี Coulometric Karl Fisher Titration ด้วย Electricity Titration ซึ่งเป็นการเติมอิเล็กโตรไลด์เข้าไปใน Titration Cell แล้วทำการวัดความชื้นจากการเกิดขึ้นของ Free Iodine ที่ใช้ในการไตรเตรทด้วยเครื่อง Mitsubishi Portable Karl Fisher Moisture Meter Model CA-21 ตามมาตรฐาน ASTM D1533

ตารางที่ 2.9 ค่าการตรวจวัดความชื้น

Water Content [mg/kg]	ระดับแรงดันไฟฟ้า	Good
มาตรฐาน ASTM D1553	<= 69 kV	<= 35
	69 – 288 kV	<= 25
	> 345 kV	<= 20
มาตรฐาน IEEE c57.106	<= 69 kV	< 15
	69 – 288 kV	< 8
	> 345 kV	< 5
มาตรฐาน IEC 60814	< 72.5 kV	< 10
	72.5 – 170 kV	< 5
	> 170 kV	< 5

2.5.4 การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นของแข็ง (Furan)

โดยจะถูกสร้างขึ้นมาจากเซลลูโลสในการเสื่อมสภาพของฉนวนกระดาษที่เกิดจากความร้อน และเกิดการออกซิเดชันและความเครียดทางไฟฟ้า ความเข้มข้น Furans ที่วัดโดยโครมาโต ของเหลวประสิทธิภาพสูง (HPLC) หรือก๊าซ chromatography - Mass Spectrometry (GC/MS) อยู่บนพื้นฐานตามมาตรฐาน ASTM D 5837

ตารางที่ 2.10 ค่าการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เป็นของแข็ง

Furan Analysis	Voltage Class	Acceptable value (ppb)
ASTM D5873	> 115 kV	< 1000 for open type < 100 for sealed type

2.5.5 การวัดแรงตึงผิวของน้ำมัน (Interfacial Tension)

ในการวัดแรงตึงผิวของน้ำมันหม้อแปลง จะทำการวัดแรงดึงในแนวดิ่ง ซึ่งเป็นแรงตึงผิวของ ของเหลวที่กระทำกับวัตถุทดสอบ ด้วยเครื่อง Ring/Plate Tensiometer TD1C เป็นการวัดแรงตึงผิว ตรงรอยต่อของของเหลว 2 ชนิด คือ น้ำและน้ำมันมีหน่วยเป็น dynes/cm หรือ mN/m. ค่า IFT จะ บอกถึง contaminants และ products ของ deterioration polar groups ของน้ำมัน ซึ่งจะมีผลทำให้ น้ำมันเกิดเป็นยางเหนียวและมีกรดเพิ่มขึ้นกำหนดให้ recondition น้ำมันเมื่อค่า IFT ลดลงเหลือ 24mN/m และ reclaimed เมื่อน้ำมันลดค่าลงเหลือ 16 mN/m ปกติจะทำการทดสอบทุก 1 ปี ตาม มาตรฐาน ASTM D 971-99 a

ตารางที่ 2.11 เกณฑ์ในการพิจารณาแรงตึงผิวของน้ำมัน

Interfacial Tension (mN/m)	ระดับแรงดันไฟฟ้า	Good
มาตรฐาน ASTM D971	<= 69 kV	> 24
	69 – 288 kV	> 26
	> 345 kV	> 30
มาตรฐาน IEEE c57.106	<= 69 kV	> 25
	69 – 288 kV	> 30
	> 345 kV	> 32
มาตรฐาน ISO 6295	< 72.5 kV	> 28
	72.5 – 170 kV	
	> 170 kV	

2.5.6 การทดสอบเพื่อหาสิ่งปนเปื้อน (Neutralization Number (tg d), Acidity)

เป็นการทดสอบเพื่อหาสิ่งปนเปื้อนหรือสารเคมี บางชนิด ที่ปะปนอยู่ในน้ำมัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกรดที่เกิดจากน้ำมันเสื่อมสภาพ ตามมาตรฐาน ASTM D644-95

ตารางที่ 2.12 เกณฑ์ในการพิจารณาหาสิ่งเจือปนในน้ำมัน

Acid Number (mg KOH/g)	ระดับแรงดันไฟฟ้า	Good
มาตรฐาน ASTM D974	<= 69 kV	0.2
	69 – 288 kV	0.2
	> 345 kV	0.1
มาตรฐาน IEEE c57.106	<= 69 kV	0.2
	69 – 288 kV	0.15
	> 345 kV	0.1
มาตรฐาน IEC 62021	< 72.5 kV	0.15
	72.5 – 170 kV	0.1
	> 170 kV	0.1

2.6 การตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ (FRA) [5]

หม้อแปลงไฟฟ้าคือองค์ประกอบสำคัญส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้า โดยความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบที่รองรับ ซึ่งอาจเกิดจากการขาดการ ตรวจสอบ และบำรุงรักษา สิ่งที่สำคัญที่สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ คือการตรวจสอบประสิทธิภาพข องหม้อแปลงเป็นประจำ

การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ (Frequency Response Analysis : FRA) เป็นวิธีการตรวจสอบหม้อแปลงเพื่อดูแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีความไวในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงภายในขดลวดอาจนำไปสู่การลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่จะแสดงถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงแม้จะเกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อย โดยการประเมินสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าควรมีการเปรียบเทียบ กับการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกัน

2.7 หลักในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเราจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ เพื่อติดตามผลกระทบที่ เกิดขึ้นกับตัวหม้อแปลง ไฟฟ้า เพื่อที่จะให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีอยู่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการตรวจวัดนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบเนื่องจากหลายกรณีเพื่อตรวจหาความผิดปกติของหม้อแปลง เช่น

- การตรวจสอบคุณภาพของหม้อแปลงขณะที่กำลังทำงาน
- ก่อนและหลังจากการขนส่งหรือเคลื่อนย้ายสถานที่ติดตั้งหม้อแปลง
- หลังจากการเกิดความผิดพลาดหรือการลัดวงจรภายในระบบ
- หลังจากเกิดเหตุการณ์ภัยพิบัติ เช่น แผ่นดินไหว หรือ เกิดฟ้าผ่า
- ก่อนและหลังจากการบำรุงรักษาหม้อแปลง

2.8 เทคนิคในการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ [6]

จนถึงขณะนี้การวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ยังมีความหลากหลายมาตรฐาน ในการตั้งค่าที่ใช้ในการวัด นอกจากนี้ยังมีวิธีในการวัดแยกเป็น 2 วิธี คือ วิธี การกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ (Low Voltage Impulse ; LVI) และ วิธีการกวาดความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis ; SFRA)

2.8.1 วิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ (Low Voltage Impulse)

การกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ เป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากแรง ดัน กระตุ้นที่เริ่มทดสอบ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการกระตุ้นจากเครื่องกำเนิด ซึ่งจะทำการวัดพร้อมกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ หรือกระแสจากกราวด์ ซึ่งสามารถทำการวัดได้หลายจุดในเวลาเดียวกัน ซึ่งการวัด ค่าจาก Time domain จะแปลงไปยัง Frequency domain โดยการคำนวณ Fourier Transform และ Transfer Function ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาทั้งสอง

ข้อดีของวิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ

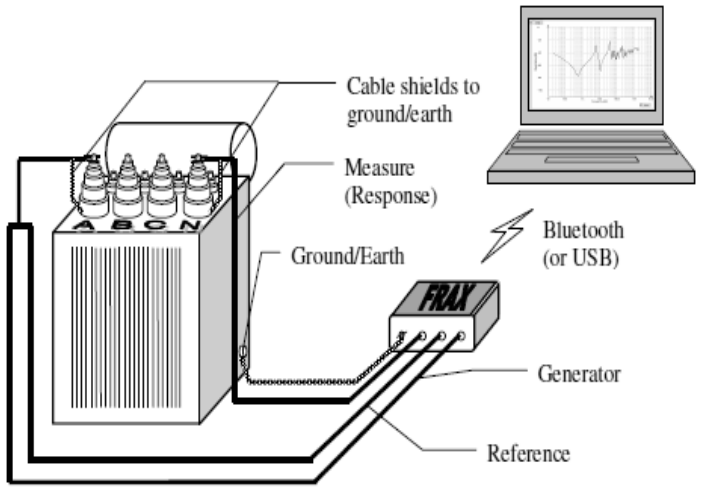
- สามารถตรวจวัดได้หลายจุดในเวลาเดียวกัน ลดเวลาการหยุดทำงานของหม้อแปลงขณะทำการตรวจวัด

ข้อเสียของวิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ

- ที่ความถี่ต่ำสัญญาณที่ได้จะมีความละเอียดต่ำ
- ไม่สามารถกรองสัญญาณรบกวนได้
- คลื่นความถี่และกำลังของสัญญาณที่ส่งเข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของสัญญาณที่ได้รับ
- มีอุปกรณ์จำนวนมาก
- ความถูกต้องขึ้นอยู่กับการคำนวณทางคณิตศาสตร์

2.8.2 วิธีการกวาดความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis)

วิธีการกวาดความถี่จะทำการทดสอบโดยการปล่อยสัญญาณความถี่ตั้งแต่ 20 Hz – 2 MHz เข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อนำสัญญาณที่ได้จากการตอบสนองต่อความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำและค่าการเก็บประจุที่เปลี่ยนแปลงไปภายในตัวหม้อแปลง ไฟฟ้า ซึ่งวิธีการกวาดความถี่เป็นวิธีที่ช้ากว่าวิธีการกระตุ้นด้วยแรงดันต่ำ เนื่องจากวิธีนี้จะทำการกวาดความถี่ที่ใช้กระตุ้นเพียงสัญญา ณเดียวกับขั้วของหม้อแปลงที่ทำการเชื่อมต่ออยู่ โดยจะทำการปล่อยสัญญาณเข้าสู่ขั้วของหม้อแปลงที่ต้องการทดสอบ ซึ่งจะมีการกวาดความถี่ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูงครั้งละ 1 ขั้วเท่านั้น จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการทดสอบนานเพื่อทำการทดสอบให้ครบทุกจุด



ภาพที่ 2.8 การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ในการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า
ด้วยวิธีการกวาดความถี่กับหม้อแปลงไฟฟ้า

ข้อดีของวิธีการกวาดความถี่

- สัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์มีช่วงที่กว้าง
- สามารถปรับความถี่ในการทดสอบได้
- สามารถควบคุมความละเอียดโดยการกำหนดช่วงความถี่ได้
- มีอุปกรณ์น้อย

ข้อเสียของวิธีการกวาดความถี่

- มาตรฐาน ในการเปรียบเทียบการส่งผ่านพลังงานมีอยู่หลายมาตรฐาน ซึ่งจะแบ่งช่วงของความที่ในการพิจารณาแตกต่างกัน
- ในการวัดหม้อแปลงแต่ละลูกต้องใช้เวลานานขึ้นอยู่กับ จำนวนจุดที่ต้องการวัดและระดับในการกรองสัญญาณรบกวน
- เทคนิคในการหาค่าเฉลี่ยต้องใช้เวลานาน

ซึ่งในโครงงานนี้จะใช้การตรวจสอบการตอบสนองความถี่ ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการกวาดความถี่ (Sweep Frequency Response Analysis)

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ด้วยวิธีการกวาดความถี่ถือเป็น วิธีการที่ มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบ หม้อแปลงไฟฟ้า ทั้งภายในแกนเหล็ก ภายในขดลวด และส่วนเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยการวัดค่าของการตอบสนองต่อความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ซึ่งความแตกต่างที่ปรากฏจะบ่งบอกถึงความเสียหายที่หม้อแปลงได้รับ ซึ่งสามารถตรวจสอบเพิ่มเติมได้ด้วยการตรวจสอบภายในโครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้าในลำดับต่อไป

สำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการกวาดความถี่ มีรายละเอียดพื้นฐานดังนี้

- เป็นการทดสอบแบบ off – line
- มีการวัดการตอบสนองของความถี่ในช่วงที่กว้าง และ ผลที่ได้จากการตอบสนองของ Transfer Function มีหน่วยเป็น dB
- การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองความถี่ในช่วงความถี่ต่างๆ สามารถตรวจพบได้เมื่อทำการวัดเทียบกับค่าอ้างอิงที่ทำการบันทึกไว้
- เป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบความผิดปกติที่หลากหลาย เช่น ภายในขดลวด ภายในแกนเหล็ก และ จุดเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้าในการตรวจสอบเพียงวิธีเดียว

สำหรับความผิดปกติที่สามารถตรวจพบ

- ความผิดปกติภายในขดลวด เช่น ความผิดปกติภายในโครงสร้างของขดลวด ระยะระหว่างขดลวด และการลัดวงจร
- ความผิดปกติภายในแกนเหล็ก เช่น การเคลื่อนที่ขอ งแกนเหล็ก การเชื่อมต่อของสายดิน ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแกนเหล็ก

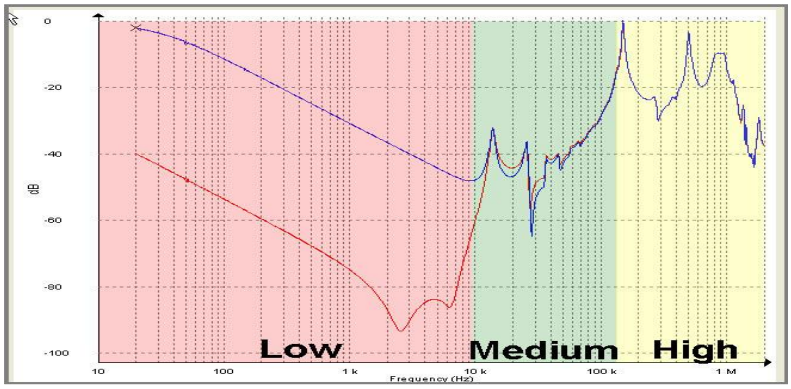
- ความผิดปกติแล ะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้ าง เช่น ชิ้นส่วนต่างๆของหม้อแปลง จุดเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ นั้นจะใช้ความถี่ตั้งแต่ประมาณ 20 Hz – 2 MHz โดยจะแบ่งอย่างง่ายออกเป็น 3 ช่วงความถี่ คือ

- ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency) ประมาณ 20 Hz – 10 kHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพของแกนเหล็กภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

- ย่านความถี่ปานกลาง (Medium Frequency) ประมาณ 10 kHz – 100 kHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพภายในขดลวดต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

- ย่านความถี่สูง (High frequency) ประมาณ 100 kHz – 2 MHz สามารถบ่งบอกถึงสภาพของชิ้นส่วนในการเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพที่ 2.9 การแบ่งย่านความถี่ต่างๆในการตรวจวัด

การตรวจสอบหม้อแปลงด้วยวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ ถือเป็นวิธีการที่ เหมาะสมที่สุดในการ ประเมินผลของการชำรุดหรือการเสียรูปของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยแนวคิดของการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่สำหรับการประเมินสภาพภายในหม้อแปลง ขึ้นอยู่กับความจริงที่ว่าการเบี่ยงเบนหรือการผิดรูปทางเรขาคณิตของขดลวดเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะภายในซึ่งจะส่งผลให้ความจุและการเหนี่ยวนำไฟฟ้าภายในของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งความแตกต่างของสิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองความถี่ ซึ่งสังเกตได้จากการส่งผ่านพลังงาน (Transfer Function) ภายในหม้อแปลงจากด้านแรงดันด้านอินพุทและแรงดันด้านเอาท์พุท

2.9 ตัวอย่างการเชื่อมต่อ [7]

ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบการตอบสนองความถี่เข้ากับตัวหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีด้วยกันหลายวิธี โดยขึ้นอยู่กับความต้องการในการตรวจสอบว่าต้องการทราบความผิดปกติในส่วนใดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะยกตัวอย่างการเชื่อมต่อใน 2 มาตรฐาน ดังต่อไปนี้

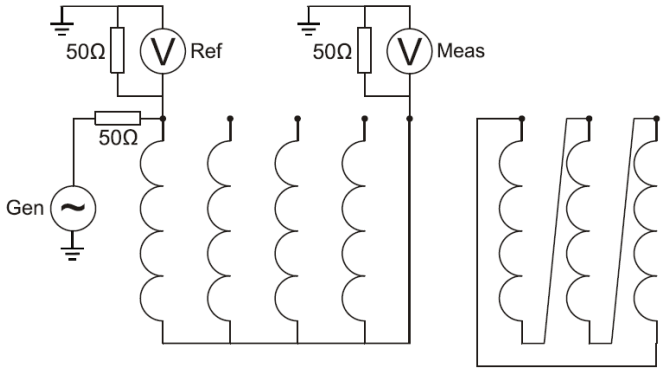
2.9.1 แบบ CIGRE report 342

- End - to - End Open
- End - to - End Short – Circuit
- Capacitive Inter – Winding (CIW)
- Inductive Inter – Winding (IIW)

2.9.2 แบบ IEEE FRA draft

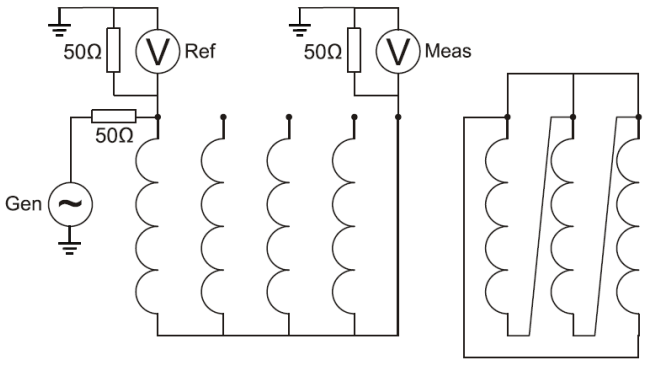
- Open Circuit Self Admittance (OC)
- Short Circuit Self Admittance (SC)
- Inter – Winding (IW)
- Transfer Admittance (TA)

- การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Open หรือ Open Circuit Self Admittance (OC) สัญญาณความถี่ จะถูกปล่อยเข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยจะใช้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำในการทดสอบซึ่งถือเป็นการทดสอบพื้นฐานในการตรวจสอบขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการวัดที่ค่าแรงดันและกระแสกระตุ้นของแต่ละเฟส



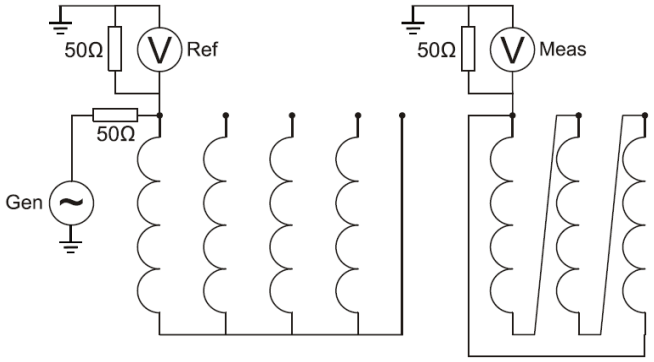
ภาพที่ 2.10 การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Open หรือ Open Circuit Self Admittance (OC)

- การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Short – Circuit หรือ Short Circuit Self Admittance (SC) การวัดจะเหมือนกับแบบแรกแต่ในขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง ไฟฟ้า จะทำการลัดวงจรถึงกันโดยปล่อยสัญญาณความถี่ต่ำเข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานภายในขดลวด



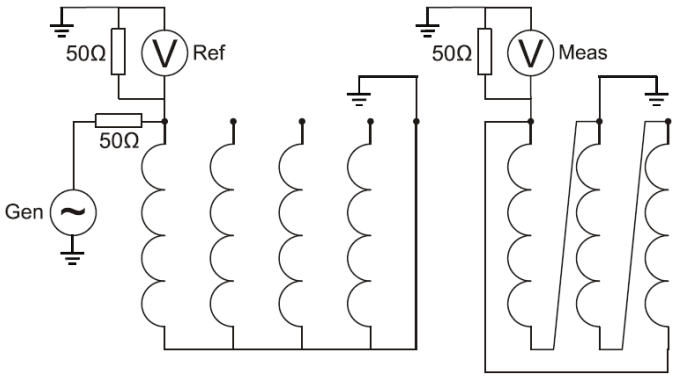
ภาพที่ 2.11 การเชื่อมต่อแบบ End - to - End Short - Circuit
หรือ Short Circuit Self Admittance (SC)

- การเชื่อมต่อแบบ Capacitive Inter – Winding (CIW) หรือ Inter – Winding (IW) สัญญาณความถี่ จะถูกปล่อยเข้าสู่ขดลวดด้านทุติยภูมิและจะทำการวัดที่ขดลวดด้าน ปฐมภูมิในเฟสเดียวกัน การทดสอบนี้เป็นการตรวจสอบค่าการเก็บประจุและค่าการสูญเสียต่อค่าพาเวอร์แฟคเตอร์



ภาพที่ 2.12 การเชื่อมต่อแบบ Capacitive Inter – Winding (CIW) หรือ Inter – Winding (IW)

- การเชื่อมต่อแบบ Inductive Inter – Winding (IIW) หรือ Transfer Admittance (TA) สัญญาณความถี่ถูกปล่อยเข้าสู่ ขดลวดด้าน ทุติยภูมิและทำการวัดที่ขดลวดด้าน ปฐมภูมิเหมือนกับการเชื่อมต่อในวิธีที่สาม จะแตกต่างกันที่แต่ละด้านของขดลวดจะทำการต่อลงดินซึ่งการทดสอบนี้จะเป็นการตรวจสอบการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของขดลวดจากด้านปฐมภูมิไปสู่ด้านทุติยภูมิ



ภาพที่ 2.13 การเชื่อมต่อแบบ Inductive Inter – Winding (IIW) หรือ Transfer Admittance (TA)

2.11 การวินิจฉัยความผิดปกติ

การวินิจฉัยความผิดปกติของหม้อแปลงประกอบด้วยการวัดค่าความต้านทานของแกนเหล็กขดลวดและชิ้นส่วนต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ในช่วงความถี่ต่างๆและนำมาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงเพื่อทำการเปรียบเทียบเพื่อหาความเบี่ยงเบนไปของกราฟแสดงการตอบสนองความถี่ แม้จะเป็นเพียงการเบี่ยงเบนแม้เพียงเล็กน้อย หากไม่ได้รับการตรวจสอบและทำการบำรุงรักษาอาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้ในอนาคต โดยความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นจากหลายกรณี เช่น เกิดลัดวงจรภายในระบบซึ่งอาจส่งผลทำให้หม้อแปลงเกิดการชำรุด เกิดความเสียหายในหลายส่วนของตัวหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้น ถ้าใช้การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่จะพบว่าการตอบสนองที่ความถี่ต่ำการไหลวนของกระแสภายในแกนเหล็กโดยหากภายในแกนเหล็กมีความเสียหายก็จะส่งผลให้การตอบสนองต่อความถี่ในย่านความถี่ต่ำเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในขณะที่ย่านความถี่ปานกลางจะมีความไวต่อความผิดปกติหรือการเปลี่ยนแปลงภายในคุณสมบัติของขดลวด หากมีการเพิ่มขึ้นของความถี่หมายถึงการเคลื่อนไหวของแกนขดลวดลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยปกติหมายถึงการเคลื่อนไหวของรัศมีในขดลวดชั้นใน ส่วนในย่านความถี่สูงการตอบสนองต่อความถี่สูงของหม้อแปลงมีความไวต่ อความผิดปกติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของชิ้นส่วนของขดลวดและส่วนเชื่อมต่อต่างๆภายในหม้อแปลงไฟฟ้า

การเปรียบเทียบที่ดีที่สุดคือการทำการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดในจุดเดียวกันกับที่ทำการวัดในครั้งแรกเพื่อเก็บค่าอ้างอิง โดยหากเป็นหม้อแปลงน้ำมันก็ควรจะมีระดับของน้ำมันใกล้เคียงกับปริมาณที่ทำการวัดเพื่อเก็บค่าอ้างอิงและเป็นน้ำมันชนิดเดิม เนื่องจากชนิดของน้ำมัน ปริมาณน้ำมัน และค่าความชื้นที่อยู่ภายในน้ำมันหม้อแปลง อาจส่งผลต่อการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าได้

2.12 การเปรียบเทียบ

โดยทั่วไปภาพของการตอบสนองความถี่มีจุดมุ่งหมายในการตรวจสอบความเบี่ยงเบน ของการตอบสนองความถี่ในช่วงต่างๆ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในความถี่ใหม่อาจแสดงถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้น ภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แม้ว่าการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่สามารถตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้น กับหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ แต่ยังคงต้องการการวินิจฉัยเพิ่มเติมด้วยการตรวจสอบวิธีอื่นๆ เพื่อนำผลมาวิเคราะห์ร่วมกัน ในการเปรียบเทียบสัญญาณของการตอบสนองความถี่ โดยทั่วไปจะเป็นการส่งผ่านพลังงานจากด้านอินพุทและเอาท์พุท ซึ่งโดยปกติจะมีความต้านทานของขดลวด อัตราส่วนแรงดันระหว่างขดลวดหรือการลดลงของสัญญาณที่ได้จากการวัด โดยในการวัดเพื่อเก็บค่าอ้างอิงมักจะเป็นการเปรียบเทียบกับเฟสอื่นๆ เทียบกับการวัดเพื่อเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันของสัญญาณและในการตรวจสอบจริง เมื่อทำการวัดเพื่อเทียบกับสัญญาณอ้างอิงจะมีความถูกต้องเชื่อถือได้มากขึ้นโดยรู ปแบบที่ได้เมื่อนำเปรียบเทียบกันจะมีความแม่นยำ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลงจากความแตกต่างมาประกอบกันเพื่อหาความเปลี่ยนแปลงภายในหม้อแปลง ซึ่งการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของการส่งผ่านพลังงาน จะมีความสัมพันธ์ต่อความผิดปกติของหม้อแปลง ซึ่งสิ่งเหล่านี้ปกติจะตรวจสอบได้ยากและใช้เวลานานและการประเมินมักมีความผิดพลาด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อหม้อแปลง ไฟฟ้าอย่างมาก

ภาพที่ 2.14 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนและหลังการเกิดการลัดวงจร

ตารางที่ 2.14 ระดับความถี่ที่ใช้พิจารณาความผิดปกติ

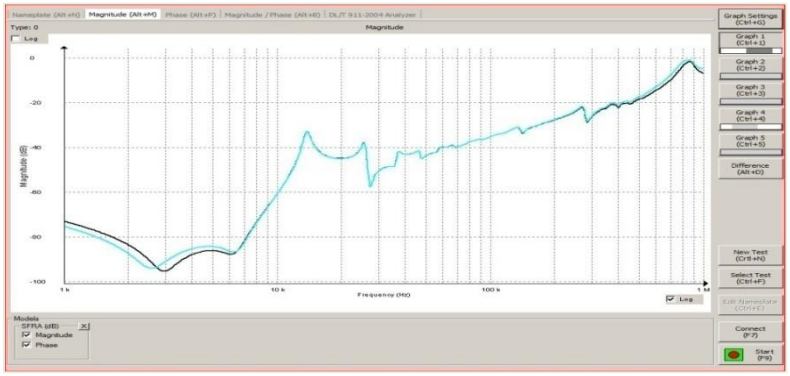
ความถี่	ความผิดปกติถี่ตรวจพบ
< 2 kHz	การเสียรูปของแกนเหล็ก การลัดวงจรของขดลวด และสนามแม่เหล็กตกค้าง
2 kHz - 20 kHz	การเคลื่อนที่ของขดลวดระหว่างขดลวดกับโครงสร้างภายใน
20 kHz - 400 kHz	การเสียรูปของขดลวดหลัก หรือ ขดลวดในชุดต่างๆ
400 kHz – 1 MHz	การเคลื่อ นที่ของขอลวดหลัก และ ขดลวดในชุด ต่างๆ การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของกราวด์

2.13 กรณีศึกษา

2.13.1 การตรวจสอบก่อนและหลังการบำรุงรักษา

การตรวจสอบหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าทำได้ในหลายกรณี เช่นตัวอย่างการวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ก่อนและหลังการบำรุงรักษา โดยทำการทดสอบกับหม้อแปลง Single - phase Generator Transformer , 400 kV

ภาพที่ 2.15 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนการบำรุงรักษา



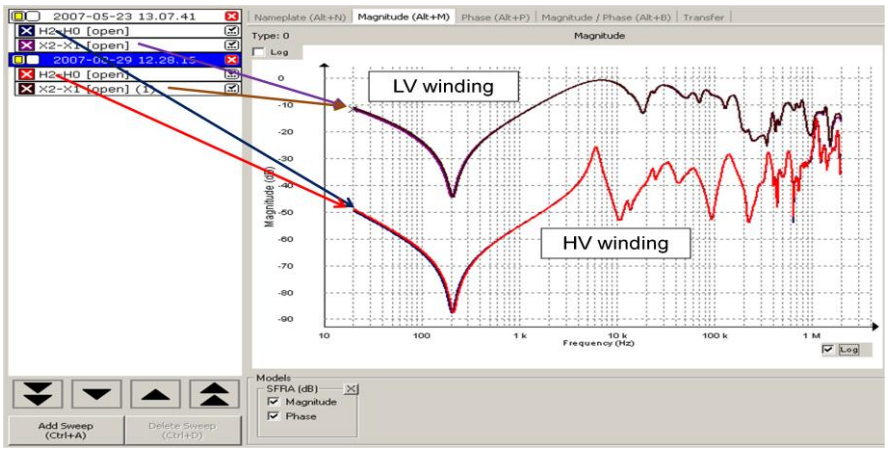
ภาพที่ 2.16 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงหลังการบำรุงรักษา

จากภาพที่ 2.15 เส้นสีฟ้าแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลง ไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นค่าอ้างอิงขณะเริ่มติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนเส้นสีเขียวแสดงการตอบสนองความถี่ ของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากเกิดความผิดปกติของระบบจึงได้ทำการตรวจสอบ เพื่อหาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งพบว่าที่ช่วงความถี่ต่ำถึงช่วงความถี่ปานกลางที่ประมาณ 10 Hz – 100 kHz กราฟที่ได้มีความแตกต่างกับค่าอ้างอิงมาก จึงต้องทำการตรวจสอบเพิ่มเติมและบำ รุงรักษาซึ่งพบความเสียหายในส่วนของแกนเหล็กและขดลวดภายในหม้อแปลง

จากภาพที่ 2.16 เส้นสีฟ้าแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำการวัดเป็นค่าอ้างอิง ส่วนเส้นสีดำแสดงการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าหลังจากทำการบำรุงรักษา ซึ่งจะเห็นว่ากราฟที่ได้จากการตรวจวัดหลังการบำรุงรักษามีความใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมากขึ้น

2.13.2 การตรวจสอบหม้อแปลงหลังการเกิดความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการเกิดการลัดวงจรภายในระบบหรือความผิดปกติใดๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบอาจมีความกังวลว่าความผิดปกติใดๆ ที่เกิดขึ้นในระบบอาจส่งผลกระทบถึงหม้อแปลงที่ทำการจ่ายพลังงาน จึงมีความจำเป็น ต้องทำการตรวจสอบโดยในการทดสอบนี้จะทำการตรวจสอบหม้อแปลง Single phase Generator Step – up transformer 105 MVA



ภาพที่ 2.17 การตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงก่อนและหลังการเกิดความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากภาพที่ 2.17 เป็นการตรวจวัดการตอบสนองความถี่ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยจากกราฟ เส้นสีม่วงคือค่าอ้างอิงส่วนสี น้ำตาลคือการตอบสนองความถี่ ของหม้อแปลงไฟฟ้า หลังจากเกิด การลัดวงจร ของด้านปฐมภูมิ และเส้นสีน้ำเงินคือค่าอ้างอิงส่วนเส้นสีแดงคือการตอบสนองความถี่หลังจากเกิดการลัดวงจรของด้านทุติยภูมิ จากการพิจารณากราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของทั้งด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิแสดงว่าการเกิดความผิดปกติ ภายในระบบไม่ได้ส่งผลกระทบต่อตัวหม้อแปลงไฟฟ้า