

บทที่ 2 power transformer

2.1 บทนำ

หม้อแปลง (power transformer) เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในสถานี และสำคัญในระบบไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนแรงดันให้สูงขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับระบบส่งกำลังไฟฟ้า และ เปลี่ยนแรงดันให้ต่ำลงเพื่อให้เหมาะสมกับระบบจำหน่าย

2.2 ข้อกำหนดเฉพาะ (specification)

ผู้ซื้อสามารถจัดทำข้อกำหนดเฉพาะ (specification) ขึ้นเอง โดยมีเนื้อหาหลักเป็นไปตามมาตรฐานสากล เช่น IEC std, IEEE/ANSI std. และ ระบุความต้องการ ขนาด ลักษณะ ต่างๆ ไว้ในเอกสารระบุพิกัดและรูปร่าง (ratings and features) ตัวอย่างเนื้อหาของ specification ได้แก่

แรงดันของขดลวดแต่ละชุด	ความถี่ของระบบไฟฟ้า
MVA ตาม cooling ต่างๆที่กำหนด	cooling
แรงดันสูงสุดของระบบในแต่ละด้าน	insulation level ของแต่ละขดลวด และ neutral
creepage distance ของ bushing	off-load / on-load tap-changer
tapping range	ตำแหน่งติดตั้ง tap-changer
vector group	% impedance voltage ที่ max. rating
top oil temperature rise	winding temperature rise
ระดับความดัง (noise)	bushing current transformer
system fault level	losses evaluation factor
bonus for losses	penalty for losses
จำนวนหม้อแปลงที่ต้องการซื้อ	สถานที่ส่งและวันที่ส่งของ

ในกรณีที่หม้อแปลงมีขนาดใหญ่อาจมีปัญหาเรื่องการขนส่งควรระบุขนาดและน้ำหนักให้เหมาะสมกับท่าเรือ เส้นทางขนย้าย และ การติดตั้งที่สถานี

ในกรณีที่ต้องการนำหม้อแปลงไปใช้งานเพื่อขนานกับหม้อแปลงที่ใช้งานอยู่ในสถานี ควรแจ้งข้อมูลของหม้อแปลงเก่าที่ใช้งานอยู่ให้ผู้ผลิตทราบ เช่น

MVA rating	vector group	voltage ratio / range
impedance voltage ที่ตำแหน่ง max-normal-min tap position		
tap-changer control scheme		

นอกจากนี้ผู้ซื้ออาจระบุข้อกำหนดต่างๆที่อาจเป็นประโยชน์กับการออกแบบของผู้ผลิต เช่น สีของ tank, ระบบ sealing ของ conservator, จำนวน fault / short circuit ที่เกิดขึ้นต่อปี (rate of

fault occurrence) และ รวมถึงการทดสอบพิเศษนอกเหนือจากระเบิดในมาตรฐานสากล การกำหนดในสิ่งที่ต้องการที่นอกเหนือ หรือ ต่างไปจากมาตรฐานของผู้ผลิต ซึ่งมักกระทบกับราคา และ สิ่งสำคัญอาจทำให้ผู้ผลิตจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงวิธีการผลิตไปจากมาตรฐานของบริษัท อาจทำให้กระทบกับคุณภาพของหม้อแปลง จึงควรพิจารณาถึงความต้องการว่ามีจำเป็นจริง

2.3 ความสูญเสีย (losses) และ impedance

ความสูญเสียในหม้อแปลงมี สองชนิด คือ

2.3.1 no-load loss

เกิดขึ้นขณะป้อนไฟ (energize) เข้าขดลวดหม้อแปลงขดหนึ่ง และขดที่เหลือไม่ต่อกับ load หรือ open ไว้ กระแสที่ไหลในขดลวดขณะนั้นเรียกว่า no-load current รูปร่างของกระแสจะเพี้ยนรูป ไม่เป็น sinusoidal wave เพราะประกอบด้วยกระแส harmonic และ จะเพี้ยนรูปมากขึ้นในขณะ ที่แรงดันเพิ่มสูงขึ้น เป็นเพราะแกนเหล็ก (steel core) มีคุณลักษณะเป็น non-linear

กระแส no-load และ loss มีความสัมพันธ์กับ flux density, frequency, ปริมาณเหล็ก / ชนิดของเหล็ก (grade) / ความหนาของเหล็กที่ใช้ทำแกน ตลอดจนการออกแบบและเทคนิคการ ประกอบแกนเหล็ก การวัด no-load loss ต้องคำนึงถึง เครื่องมือวัด เพราะ กระแสที่วัดมี harmonic ผสมอยู่ และกระแสมี power factor ต่ำมาก

2.3.2 load loss

ความสูญเสียนี้เกิดขึ้นในขณะที่หม้อแปลงจ่าย load ความสูญเสียเกิดจาก

- จากความต้านทานของลวดตัวนำ I^2R
- จาก eddy current loss ในขดลวด และ
- จาก stray loss ใน ส่วนประกอบที่เป็นเหล็ก เช่น tank, core clamp

load loss ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่คือ I^2R และส่วนที่เหลือเป็น loss ที่เกิดจาก leakage flux ขดลวด มีลักษณะที่เกิดจากการพันลวดตัวนำแต่ละ turn ทับกันแน่น และแต่ละขดมี ลักษณะเกี่ยวกันหรือสัมพันธ์กันด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic coupling) ในขณะ no-load ส่วนใหญ่ของ magnetic flux จะไหลวนอยู่ในแกนเหล็ก เมื่อจ่าย load จะเกิด ampere-turn ของขดลวด แต่ละขด ทำให้เกิด leakage flux ไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างขดลวด มีผลทำให้ flux ทั้งหมดไม่ได้ คล้องขดลวดทั้งหมดเท่ากัน

leakage flux ที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้

- เกิดแรงระหว่างขดลวดที่มี short circuit ไหลผ่าน
- เกิด eddy current loss ในลวดตัวนำของขดลวด
- เกิด stray loss ในส่วนที่เป็นเหล็ก
- ต้องใช้ reactive power และทำให้เกิด reactive voltage drop

การวัด load loss ก็ไม่ง่ายเช่นเดียวกัน เพราะไม่สามารถวัดความสูญเสียได้ที่อุณหภูมิสูงสุดขณะมีกระแสฟลักซ์ไหลได้โดยตรง ความต้านทาน (resistance) ของขดลวดจะเพิ่มตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น I^2R loss จะแปรผันตรงกับค่าความต้านทาน แต่ eddy current loss แปรผันกลับกับค่าความต้านทาน ดังนั้น loss ที่วัดได้จะถูกคำนวณเปลี่ยนเป็นที่อุณหภูมิมาตรฐานที่ 75°C หรือที่ 85°C ตามชนิดของฉนวน 105°C หรือ 120°C ที่ใช้ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นค่า guarantee ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นคือไม่สามารถวัดค่าอุณหภูมิของขดลวดได้ละเอียดถูกต้องนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในขณะที่อุณหภูมิของลวดตัวนำกำลังเปลี่ยนแปลง และ stray loss ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของเหล็กแต่ละชนิดที่ใช้ ซึ่งมีค่า resistance coefficient ต่างจากทองแดง อาจไม่คงที่และเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ รวมทั้งยังไม่สามารถวัด eddy current loss ในขดลวดแยกออกจาก stray loss ได้

ในหม้อแปลงรุ่นใหม่ ๆ จะมี load losses ต่ำ ทำให้ power factor ของวงจรที่วัดต่ำมาก หม้อแปลงที่มี capacity ยิ่งมาก power factor ยิ่งต่ำ ต้องเลือกใช้ watt-meter ให้เหมาะสม

2.3.3 impedance

impedance ระหว่างขดลวดคู่หนึ่งอาจระบุเป็นค่า per unit impedance สามารถหาได้โดยป้อนแรงดันเข้าที่ขดลวดที่หนึ่ง และ short ขดลวดที่สองไว้ อ่านค่าแรงดันขณะที่มีกระแสขนาดเท่าฟลักซ์ (rated current) ไหลในขดลวด ค่าแรงดันที่อ่านได้หารด้วยค่าแรงดันฟลักซ์ (rated voltage) จะได้ค่า per unit voltage หรือ per unit impedance เนื่องจากเป็นแรงดันที่มีกระแสฟลักซ์เหมือนกัน หากคูณค่าที่คำนวณได้ด้วย ร้อย จะเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ เรียกว่า percent impedance voltage

per unit impedance = Z ประกอบด้วย

per unit resistance = R คือ load loss เป็น kW หารด้วย kVA rating และ

per unit leakage reactance = X คือ kVAR ที่เกิดขึ้นขณะวัด หารด้วย kVA rating

มีความสัมพันธ์กันคือ $Z^2 = R^2 + X^2$ ค่า Z , R และ X สามารถทำเป็น ohm ได้

โดยคูณ per unit ด้วย ค่า rated impedance = V^2/KVA

positive และ negative sequence impedance ของ หม้อแปลงสามเฟส จะมีค่าเท่ากัน การวัดหาค่า positive sequence impedance จะใช้ source ที่เป็นไฟ balanced three phase

ส่วน zero sequence impedance ของขดลวด จะขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบแกนเหล็ก และการต่อขดลวด เวลาวัดหาค่าจะใช้ไฟ single phase โดยต่อ terminal หม้อแปลงทั้งสามเฟสเข้าด้วยกันและต่อเข้ากับ line ของ source ส่วน ground ของ source ให้ต่อที่ neutral ของหม้อแปลง

กรณีที่หม้อแปลงมีขดลวดหลายชุด (multi-winding transformer) จะต้องระบุค่า impedance ของขดลวดแต่ละคู่ หากหม้อแปลงมี tap ก็จำเป็นต้องรู้ค่าของแต่ละ tap ไว้ด้วย

impedance มีผลต่อ

- voltage regulation, โดยเฉพาะเวลา start motor ตัวใหญ่ ๆ

- ปริมาณกระแสลัดวงจร
- load ที่แบ่งกันระหว่างหม้อแปลงในกรณีที่มีขนาดกัน
- การเชื่อมโยงระบบ ถ้าหม้อแปลงที่ใช้มี impedance ต่ำจะทำให้ระบบมีความแข็งแรงกว่า (stiffer) และมีเสถียรภาพมาก
- load losses ของหม้อแปลง หม้อแปลงที่มี impedance ต่ำ มีแนวโน้มว่าจะมี load losses ต่ำ
- การขนส่ง หม้อแปลงที่มี impedance ต่ำจะมีแนวโน้มว่าจะมีความสูงมากกว่าหม้อแปลงที่มี impedance สูง และจะเป็นปัญหาถ้าการขนส่งมีการจำกัดความสูง ต้องคำนึงสิ่งทีกล่าวเหล่านี้ เพราะราคาของหม้อแปลงจะขึ้นกับการกำหนดค่า impedance

2.4 guarantee และ tolerance

ผู้ผลิตหม้อแปลงต้อง guarantee ค่า impedance และ losses ที่ตำแหน่ง normal tap และถ้าจำเป็นต้องขนานหม้อแปลงจำเป็นต้อง guarantee ค่า ที่ตำแหน่งอื่นด้วย

impedance และ losses อาจแตกต่างจากค่าที่ออกแบบได้เนื่องจากวัสดุที่ใช้และการผลิต ค่าที่ต่างไปจากค่ากำหนดที่ยอมรับได้ เรียกว่าค่า tolerance

- no-load และ load losses = 0
- impedance at normal tap position = +/- 7.5-10%

2.5 cooling และ transformer loading

2.5.1 cooling: core

การระบายความร้อนออกจากแกนเหล็กของหม้อแปลงตัวใหญ่ๆ โดยใช้วิธีถ่ายความร้อนที่ผิวของแกนเหล็กอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ จำเป็นต้องใส่ cooling duct ไว้ใน core เพื่อทำให้ cooling surface เพิ่มขึ้น hot spot ของแกนเหล็กจะอยู่ที่จุดต่อของขากลาง (middle leg) กับ top yoke เหล็กบริเวณนั้นมีรอยต่อ ทางเดินของ flux เปลี่ยนทิศทาง และไม่สัมผัสกับน้ำมันโดยตรง แต่มักไม่เป็นอันตราย แต่ผิวของแกนเหล็กที่อยู่ด้านนอกที่ร้อนและกำลังสัมผัสกับน้ำมันหรือฉนวนแข็งจะเป็นอันตรายมากกว่า สาเหตุที่ทำให้ผิวรอบนอกของแกนเหล็กร้อน คือ มีบางจุดในแกนเหล็กเกิด loss สูงมากเนื่องจาก stray flux หรือมีกระแสไหลวนในแกนเหล็กสูง

2.5.2 cooling: winding

สามารถระบายความร้อนออกจากหม้อแปลงที่มีพิกัดต่ำด้วยวิธีการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (natural convection) หรือที่เรียกว่า natural cool (ON หรือ OA) อากาศจะเคลื่อนผ่านครีบระบายความร้อนของหม้อแปลงพาเอาความร้อนออกไปด้วยความเร็วของลมที่เคลื่อนผ่านด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยเป็นไปตามธรรมชาติ ถ้าหม้อแปลงลูกใหญ่มีความสูญเสียมาก ความ

ร้อนที่ลวดตัวนำสูงมาก ความเร็วลมที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอจึงจำเป็นต้องเพิ่มพัดลมที่ครีบบายความ
ร้อนเพื่อให้ลมพาความร้อนออกไปได้เร็วขึ้นเรียกว่า forced air cool (ONAF หรือ OA/FA) หรือใช้
pump ทำให้น้ำมันหมุนเวียนผ่านขดลวดเร็วขึ้นพาเอาความร้อนมาระบายที่ครีบ เรียกว่า forced oil
cool (OF) หรือใช้ทั้งสองวิธีรวมกันเรียกว่า forced oil forced air cool (OFAF หรือ FOA)

การระบายความร้อนจากขดลวดประกอบด้วยกระบวนการจาก thermodynamic และ
hydrodynamic ที่ซับซ้อน ไม่สามารถคำนวณด้วยทฤษฎีอย่างเดียวแต่ต้องอาศัยค่าคงที่ต่างๆ ที่
เกิดจากการทดลอง และการวัดค่า temperature rise ของขดลวด ก็ยังไม่มีวิธีการที่จะวัดได้โดยตรง
วิธีที่ใช้อยู่ก็ไม่ถูกต้องแม่นยำเท่าไรนัก แม้ว่าในปัจจุบันเทคโนโลยีของ fibre optic จะก้าวหน้า การ
วัดตรงตำแหน่งที่เกิด hottest spot temperature ก็ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย

การ loading หม้อแปลงมีข้อจำกัดที่ hottest spot temperature rise ของขดลวด

แต่การวัด temperature rise ของขดลวดขณะทำ temperature rise test สามารถวัดได้
เฉพาะ ค่าเฉลี่ย (average temperature) และหาค่า hottest spot temperature ด้วยการคำนวณ

ทั่วไปจะวัดค่าความต้านทานของขดลวดแต่ละชุดในขณะที่มีอุณหภูมิของขดลวด เท่ากับ
อุณหภูมิห้องทดสอบ (ambient temperature) เมื่อทำให้หม้อแปลงร้อนขึ้นโดยป้อนแรงดันที่ขดลวด
หนึ่งและวัดวงจรขดที่เหลือ จนทำให้กระแสที่ไหลในวงจรขณะนั้นเกิด total losses (core + load
loss) เท่าที่คำนวณไว้ที่ 75°C หรือที่ 85°C ตามแต่ละชนิดของ insulation ที่ใช้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่ม
ขึ้นจนมีค่าคงจะได้ top oil temperature สามารถนำไปคำนวณหา top oil temperature rise ได้
ในขณะนั้นจะวัดกระแสลงให้เหลือเท่ากับ rated current และรักษาระดับกระแสไว้ให้คงที่นาน
ไม่เกินหนึ่งชั่วโมง จึงปลดไฟออกจากขดลวด วัด dc resistance ของขดลวดแต่ละชุด โดยมีช่วง
เวลาวัดแต่ละครั้งประมาณ หนึ่งนาที นำค่าที่วัดได้มาเขียนกราฟ แสดงค่า resistance กับ เวลา จะ
เห็นว่าค่า resistance จะเป็นเส้นโค้งลดลง จากกราฟสามารถลากต่อไปที่ตำแหน่งเวลาที่ศูนย์หรือ
เวลาที่ปลดไฟออก (switch off) ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิของขดลวดขณะก่อนปลดยังมีอุณหภูมิเท่า
ขณะที่มีกระแส นำค่าเวลาที่ศูนย์นี้ไปหาค่า average winding temperature rise และ hottest
spot temperature rise ของขดลวดแต่ละชุดได้

2.6 transformer loading

มาตรฐาน IEC std., IEEE/ANSI std. จะมีข้อแนะนำ 'guide to loading of oil immersed
transformers' เพื่อเป็นแนวทางในการจ่าย load การแนะนำอยู่บนพื้นฐานของ insulation-ageing

2.7 transformer insulation

2.7.1 ฉนวนภายในหม้อแปลง transformer insulation system

ฉนวนภายในหม้อแปลงแบ่งออกได้เป็น

- major insulation เป็นฉนวนระหว่าง phase กับ ground, และระหว่างขดลวดที่อยู่ใน phase หรือ leg เดียวกัน

ส่วนของ major insulation ในและระหว่างขดลวดจะเกี่ยวข้องกับ oil duct ที่ทำด้วยฉนวนกระดาษอัดแข็งเป็นตัวกัน (solid spacer) เพื่อระบายความร้อน และทำหน้าที่เป็นแผ่นกัน (barrier board)

- minor insulation เป็นฉนวนระหว่าง turn, ระหว่าง tap, ระหว่าง section ของขดลวด ในหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน เส้นลวดตัวนำของขดลวดที่พันแต่ละรอบจะสัมผัสต่อกันจึงต้องหุ้มด้วยฉนวนกระดาษ และต้องหุ้มที่จุดต่อของลวดตัวนำด้วย

ในขณะที่ใช้งานจะมี voltage stress ที่ฉนวน จาก

- แรงดันใช้งาน (power frequency voltage)

แรงดันใช้งานจะสร้างความเครียด (stress) กับฉนวน แรงดันใช้งานอาจสูงขึ้นในกรณีที่เกิด load จำนวนมากออก แรงดันอาจสูงอยู่ช่วงหนึ่งก่อนที่ tap changer จะปรับระดับให้ต่ำลง หรือกรณีระบบเป็นชนิด unground เมื่อเกิด single line to ground fault แรงดันสายเทียบกับดินจะสูงขึ้นเป็น แรงดัน line to line แรงดันใช้งานจะมีผลต่อ major insulation เป็นส่วนใหญ่

- แรงดันที่เกิดจากฟ้าผ่าในสายส่งทำให้มีแรงดันที่สูงที่มีความชันมากวิ่งสู่สถานี (impulse voltage)

surge อาจเกิดขึ้นได้จาก direct stroke หรือ induced stroke แรงดันที่วิ่งมาที่สถานีและกระทบกับหม้อแปลงที่ตั้งอยู่ในสถานี ความรุนแรงจะขึ้นอยู่กักระบบ shielding และ grounding จะติดตั้ง surge arrester ที่สถานีเพื่อลดความรุนแรง และทำหน้าที่ควบคุมแรงดันจากฟ้าผ่านี้ให้อยู่ในระดับที่ฉนวนหม้อแปลง และอุปกรณ์อื่นๆ ทนได้ จึงควรติดตั้ง surge arrester อยู่ใกล้หม้อแปลงมากที่สุด แรงดันฟ้าผ่าจะมีผลกับ minor insulation เป็นส่วนใหญ่

- แรงดันที่เกิดจากการสับ-ปลดอุปกรณ์หรือสายส่ง (switching surge) เป็นแรงดันที่มีความถี่สูง

ขณะที่ circuit breaker บางชนิดทำงานอาจทำให้เกิด high frequency oscillation over voltage ได้ เช่นกรณี air blast breaker ตัด low inductive current หรือ การทำงานของ vacuum breaker ในบางกรณี

2.7.2 insulation level และ dielectric test

สามารถเลือกฉนวนตามขนาดระดับแรงดันระบบ ที่มาตรฐานสากลกำหนดค่า insulation level ไว้

การทดสอบต่างๆ มีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบว่าหม้อแปลงสามารถทน voltage stress ใน

ขณะใช้งานได้ คือ การทดสอบด้วย power frequency จะมั่นใจว่าฉนวนสามารถทนได้ในขณะที่แรงดันของระบบมีค่าสูงสุด (highest system voltage) ในสภาพที่อาจเกิดขึ้นตามแบบการต่อลงดินของระบบ ส่วน impulse จะทำให้มั่นใจว่า insulation level ของหม้อแปลงที่เลือกเหมาะสมกับ rating ของ surge arrester ที่เลือกใช้ การทดสอบประกอบด้วย

- applied voltage test เพื่อทดสอบ insulation ระหว่าง ขดลวดกับขดลวด และ ดิน
- induced voltage test เพื่อทดสอบ insulation ระหว่างรอบ (turn to turn insulation) ของขดลวด ขณะป้อนแรงดันจะมีการวัด partial discharge ซึ่งตามมาตรฐานจะกำหนดค่า discharge สูงสุดที่ยอมรับได้ไว้
- impulse voltage test เพื่อทดสอบ insulation ระหว่างรอบที่อยู่บริเวณต้นของขดลวด และระหว่างขดลวดกับขดลวด และขดลวดกับดิน
- switching voltage test

2.8 connections และ tapping

2.8.1 connections

transformer connection คือการบอกลักษณะการต่อขดลวดภายในหม้อแปลง แสดงด้วยสัญลักษณ์ vector เช่น Yyn0, Dy1, เป็นต้น สัญลักษณ์ตัวแรกแสดงการต่อของขดด้าน high voltage แสดงด้วยอักษรตัวใหญ่ เช่น Y, D, Z กรณีมีการต่อแบบ wye, delta, zigzag ตามลำดับ ถ้าขดลวด high voltage มี neutral ออกมา ก็จะระบุด้วย YN, ZN จะเขียนต่อตามด้วยอักษรตัวเล็ก แสดงด้าน low voltage ส่วน phase displacement จะแสดงด้วยตัวเลขชั่วโมงนาฬิกา การแสดงลักษณะจะกำหนดให้ HV อยู่ที่ 12 นาฬิกา และหมุนทวนเข็มเป็นมาตรฐาน

ถ้าไม่มีวัตถุประสงค์เฉพาะ การเลือกว่าจะใช้แบบไหน มีข้อแนะนำคือ ให้เลือกแบบ wye หรือ delta มี phase displacement เท่ากับ 0 และ 30 องศา เช่น Yy0, Dy1, Dy11, Yd1, Yd11 เป็นต้น เพราะการต่อภายในอาจมีความยุ่งยากมากขึ้นถ้าระบุมุมอื่นๆ หม้อแปลงใหญ่ควรเลือก delta connection หม้อแปลงเล็กควรเลือก wye connection เพราะ พื้นที่หน้าตัด และจำนวนรอบของลวดตัวนำ ถ้า voltage ratio น้อยกว่า 2.5 ควรเลือกการต่อแบบ auto connection

การขนานหม้อแปลง ต้องคำนึงถึง การต่อ connection ของแต่ละตัวให้เหมือนกัน

2.8.2 ขดลวด delta tertiary

เมื่อหม้อแปลงต่อแบบ wye-wye ผู้ซื้ออาจระบุขดลวดชุดที่สามเป็น ' d ' : delta tertiary connection แบบไม่ต้องการไว้จ่าย load (unloaded delta) แต่เพื่อใช้ลด zero sequence impedance และลด third harmonic voltage ขดลวดชุดที่สามนี้จะทำให้ราคาหม้อแปลงและ losses สูงขึ้น ซึ่งในบางกรณีไม่มีความจำเป็นเลย เช่น หม้อแปลงส่วนมากมีแกนเหล็กสามขา (three limb core) แกนเหล็กจะไม่มีเส้นทางให้ zero sequence หรือ triplen harmonic flux ไหล

กลับ จึงไหลกลับผ่านทางน้ำมัน และตัวถัง ที่มีค่า reluctance สูง มีผลทำให้ zero sequence impedance และ triplen harmonic voltage มีค่าต่ำกว่าหม้อแปลงที่มีห้าขา (five limb core) หรือ three single phase bank

2.8.3 tapplings

การต่อ tap ไว้ทางด้าน HV จะทำให้เป็น constant flux voltage variation คือ เมื่อแรงดันระบบด้านเข้า HV เปลี่ยนแปลง การปรับ tap เพื่อปรับรอบให้ induced flux ในแกนเหล็กคองที่ แรงดันทางด้าน LV ก็คงที่ การต่อ tap ไว้ทางด้าน LV จะทำให้เป็น variable flux voltage variation คือ แรงดันระบบด้านเข้า HV เปลี่ยนแปลง เมื่อไม่มี tap ด้าน HV ไว้ปรับรอบ induced flux ในแกนจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการเปลี่ยนแปลงแรงดัน การปรับ tap ที่อยู่ด้าน LV เพื่อให้จำนวนรอบเหมาะสมกับ induced flux แรงดันทางด้าน LV ก็คงที่

tapping มีผลกับ losses และ impedance ถ้ามีช่วงของ tap กว้างมากจะทำให้ impedance เปลี่ยนแปลงมากซึ่งจะมีผลกับความแข็งแรงของขดลวด (mechanical withstand) ในขณะที่เกิดกระแสลัดวงจรไหลผ่าน ซึ่งตรงตำแหน่ง tap ที่มี impedance ต่ำสุดอาจไม่แข็งแรงพอ

แรงดัน impulse จะมีผลกับขดลวดชุด tap อย่างมาก หม้อแปลงที่มีช่วง tap กว้างมากจะมีแรงดัน impulse ตกคร่อมที่ tap สูง ทำให้ต้องเพิ่ม insulation ที่ tap มากขึ้น นอกจากนั้นขดลวดชุด tap ยังมี resonant frequency หลาย frequency ถ้า frequency ของ switching surge ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ resonant frequency นั้น จะทำให้เกิดอันตรายกับขดลวดชุด tap ได้

2.9 ความแข็งแรงทางกลของขดลวดขณะเกิดลัดวงจร (short circuit withstand)

2.9.1 สภาพการใช้งาน

ในขณะที่เกิดลัดวงจรในระบบ หม้อแปลงจะมีกระแสลัดวงจรไหลผ่านมีค่าสูงกว่ากระแสปกติมากหลายเท่า ผลที่เกิดขึ้นกับขดลวดคือ เกิดความร้อน และแรงทางกลสูง ผู้ผลิตหม้อแปลงจึงต้องออกแบบ และผลิตให้สามารถทนสภาพนั้นได้ ผู้ซื้อต้องระบุค่า fault level ให้เหมาะสมด้วย

เราสามารถลดโอกาสที่จะเกิดลัดวงจรและความเสียหายได้หลายวิธี เช่น

- ใช้ insulation tape พันที่ bus
- ใช้ neutral หรือ series reactor เพื่อลดกระแสลัดวงจร และไม่ให้เกิด fault รุนแรง
- แยก bus ออกเป็นสองส่วนเพื่อลด fault level
- ลดจำนวนครั้งของ auto-reclosing
- ถ้าไม่ใช้ tertiary winding ควร insulate ตรงส่วน terminal หรือถ้าไม่จำเป็นต้องใช้จ่าย load ก็ไม่ต้องต่อออกมาภายนอก

2.9.2 ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ขดลวดขณะมีกระแสลัดวงจรไหล

ลวดตัวนำทองแดงในหม้อแปลงชนิดที่แช่ในน้ำมันมีอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดลัดวงจรไม่ควรเกิน 250°C ที่ค่ากระแสลัดวงจรสูงสุดในเวลา 2 วินาที พื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำทองแดงที่ใช้ (current density) ไม่ควรเกิน 94 A/mm^2 หม้อแปลงทั่วไปที่มี impedance ไม่ต่ำนักจะมี short circuit current density ต่ำกว่านี้มากจึงไม่มีปัญหาเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นกรณี short circuit current ไหลผ่านไม่เกิน 2 วินาที

2.9.3 dynamic effect จากกระแสลัดวงจร

ในขณะที่กระแสลัดวงจรสูงไหลผ่านลวดตัวนำ (conductor) ของขดลวด จะเกิดแรงทางกลและความเครียด (mechanical force and stress) ในลวดตัวนำ แรงที่เกิดขึ้นสูงสุดมีความสัมพันธ์กับ ค่า peak ของกระแสลัดวงจร (asymmetry current) ค่า asymmetry factor : k คือค่าที่สัมพันธ์กับ X/R

X = ค่ารวมของ reactance ของหม้อแปลงและระบบ

R = ค่ารวมของความต้านทานของหม้อแปลงและระบบ

ค่า peak ของกระแสลัดวงจรสูงสุดมีค่าเท่ากับ $k\sqrt{2}$ เท่าของกระแสลัดวงจร

สามารถเปิด ตารางหาค่า k ได้ เช่นเมื่อ X/R มีค่า ≥ 14 ค่า $k\sqrt{2} = 2.55$

$k\sqrt{2}$ มีค่าไม่เกิน 2.828 ในขณะที่ R มีค่าเท่ากันศูนย์

ในระบบ three phase กระแสลัดวงจรมีค่าสูงสุดอาจไม่ใช่กรณีเกิดลัดวงจรชนิดสามเฟสเสมอไป อาจเป็นชนิดหนึ่งเฟสลงดินก็ได้ถ้าวงจรมี zero impedance ต่ำกว่า positive impedance หม้อแปลง zigzag มีค่า impedance ต่ำ จะมีกระแสลัดวงจรชนิดหนึ่งเฟสสูงมาก

แรงที่ลวดตัวนำ เกิดจากกระแสในลวดตัวนำกระทำกับ leakage flux ตามกฎมือขวา (right hand rule) ทั้ง leakage flux กระแส และแรงที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน leakage flux มีทิศทางขนานกับแกนของขดลวด จะไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างขดลวดทั้งสอง คือ ขดที่มีลัดวงจร และขดที่ต่อกับ source แรงที่เกิดขึ้นที่ขดลวดชุดนอกเป็น hoop tension คือ ทำให้ขดลวดขยายออกกว้างขึ้น และเกิด hoop compression กับขดลวดชุดที่อยู่ด้านใน ทำให้เกิดยุบตัว/บวม (buckle) ความเสียหายมักเกิดที่ขดลวดชุดที่อยู่ด้านในมากกว่าชุดนอก การออกแบบ ความแข็งแรงของขดลวดชุดด้านในของหม้อแปลงตัวเล็ก อาจใช้วิธี ใส่ฉนวนอัดแข็ง (press board) ยันขดลวดไว้กับแกนในแนวตั้ง เรียกว่าเป็น insulating support แต่หม้อแปลงขนาดใหญ่มีขดลวดใหญ่ จึงมี stress เกิดขึ้นสูงมาก การพันขดลวดก็ไม่มี geometric symmetry ที่แท้จริง การยันไว้กับแกนจึงไม่มีความแข็งแรงพอ จึงต้องออกแบบให้มี stress ในขดลวดต่ำและให้ขดลวดทนแรงที่เกิดขึ้นได้ด้วยตัวเองเรียกว่า self support winding วิธีการออกแบบขดลวดชนิดนี้ผู้ผลิตแต่ละบริษัท ต้องอาศัยประสบการณ์ และการทดลองจริง ความแข็งแรงขึ้นอยู่กับชนิด และการพันขดลวดแต่ละแบบ รวมถึงความชำนาญของผู้พันและผู้ประกอบ

ที่ปลายขดลวดทั้งด้านบนและด้านล่าง leakage flux จะไม่ขนานกับแกน แต่จะกระจายเบนเข้าหาแกนและกระจายออกเข้าหาตัวถัง สามารถแยก flux ที่เบนออกเป็น flux ตามแนว radial และ axial กระแสที่ขดลวดกระทำกับ radial flux ทำให้เกิดแรงในแนวตั้ง (axial force) แรงนี้ส่วนใหญ่จะเป็นแรงกด แต่ถ้าวางขดลวดไม่ balance หรือมี magnetic center ของแต่ละขดลวดไม่อยู่ในแนวเดียวกัน จะเกิดแรงที่พยายามผลักขดลวดหนึ่งขึ้น และผลักอีกขดให้เคลื่อนลงหรือพยายามแยก magnetic center ให้ห่างกันมากขึ้น ผลจากแรงที่เกิดขึ้นแนวแกน (axial force) อาจทำให้ขดลวดเกิด axial collapse เพราะขดลวดตัวนำเกิดล้ม (tilting) หรือ ขดลวดตัวนำอาจเกิดโค้งงอระหว่าง support spacer หรือ end support ของขดลวดเกิด collapse ได้เนื่องจากแรงกดของ axial pressure

นอกจากนั้นขดลวดอาจเกิดความเสียหายจากแรงที่ผสมกันระหว่าง hoop compression และ axial force ซึ่งมีรูปร่างความเสียหายเป็น spiral tightening และเกิด hoop compression ตรงบริเวณที่มีการพันขดลวดไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) เช่น บริเวณ crossover ระหว่าง disc coil, lead, tapping เป็นต้น เนื่องจากมี support ไม่เพียงพอ

2.9.4 short circuit test

เวลาทำ short circuit test เพื่อยืนยันว่าหม้อแปลงสามารถทนกระแสลัดวงจรได้ จะทำ routine test ก่อนทดสอบ short circuit และหลังจากทำการป้อนกระแสลัดวงจรที่มีจำนวนครั้งและเงื่อนไขตามที่กำหนด ก็จะทำอีกครั้งและนำผลมาเปรียบเทียบกัน

impedance เป็นสิ่งที่เกิดตามลักษณะรูปร่าง (geometry) ของขดลวด ฉะนั้นถ้าขดลวดเปลี่ยนแปลงรูปร่างค่า impedance ก็จะไปหลังจากรับแรงที่เกิดจากกระแสสูงผ่านแต่ละครั้ง จึงมีการตรวจสอบสภาพขดลวดด้วยการวัด impedance จากค่าที่วัดได้จะใช้เปรียบเทียบกับค่าก่อนการป้อนกระแสลัดวงจร ค่าเปลี่ยนแปลงที่ยอมรับได้คือ 2% แต่หม้อแปลงที่มีขดลวดใหญ่ หากเปลี่ยนไป 0.5% ก็สามารรถเห็นขดลวดเสียรูปแล้ว ถ้าค่าสูงกว่าที่กำหนด ต้องหยุดทดสอบและเปิดหม้อแปลงออกตรวจสอบขดลวด

2.10 ความดังของเสียง (sound level)

2.10.1 แหล่งกำเนิดเสียงในหม้อแปลง

เสียงที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงทำให้เกิดความรำคาญ ในขณะที่ no-load จะเกิดเสียง ' ฮัม ' จากแกนเหล็กซึ่งเกิดจากแผ่นเหล็กที่ใช้ทำแกนสั้นเป็นผลจาก magnetic force เสียงนี้จะเดินทางผ่านน้ำมันไปยังผนัง และต่อไปยังภายนอก เสียงเกิดขึ้นด้วยหลายปัจจัย เช่น

- magnetostriction ส่วนหนึ่งมาจากการสั้นของแกนเหล็ก เนื่องจาก alternating magnetic flux ที่ไหลในแผ่นเหล็กจะทำให้พื้นที่หน้าตัดแผ่นเหล็กยืดออกเล็กน้อยและ

หตุกลับตลอดเวลาที่ถูก magnetize ความถี่ที่เกิดขึ้นจะมีระดับเป็น 2 เท่าของความถี่ของ flux ฉะนั้นในระบบ 50 Hz ความถี่ของการสั่นที่เกิดขึ้น คือ 100, 200 Hz

- ความรุนแรงของ mechanical vibration ขึ้นอยู่กับการวัดแกนว่าแน่นเพียงใด ขนาดและ เกรด ของแผ่นเหล็ก และรวมถึงส่วนที่เป็น structure
- การสั่นของ tank wall
- การ damping

จากปัญหาทั่วไปพบว่ามาจากส่วนแรกเป็นส่วนใหญ่คือ magnetrostriction

ตามวัตถุประสงค์ของมาตรฐาน ให้คำจำกัดความของ เสียงฮัมของหม้อแปลง คือ เสียงที่วัดได้จากเครื่องวัด sound level meter ซึ่งประกอบด้วย microphone, attenuator, amplifier, และ indicating meter เครื่องมือวัดจะวัดค่า sound pressure ระบุค่าเป็น logarithm scale ที่ปรับหน่วยเป็น dB

2.10.2 การออกแบบ

เสียงส่วนใหญ่ ขึ้นกับ vibration - natural frequency ของ mechanical part ต่างๆ ฉะนั้นการออกแบบส่วนประกอบที่เหมาะสมสามารถลดระดับความถี่ของเสียงให้อยู่นอกย่านที่หูคนได้ยินได้ (audible tone)

ตัวครีระบายความร้อน (radiator) และ ผนังถังที่ไม่มีการเสริมความแข็งแรง (plain unreinforce tank wall) จะไม่ค่อยมีปัญหาเพราะมี natural frequency ต่ำกว่า 100 รอบ/วินาที การทำให้ส่วนต่างๆ แข็งขึ้นและการบีบกดไว้ (clamping) ทำให้ natural frequency เลื่อนสูงเข้าสู่อ่านหูคน จะทำให้เกิดเสียงฮัมดังมากขึ้น

มีแหล่งกำเนิดเสียงอื่นที่เกิดจากการทำงานของ auxiliary equipment เช่น พัดลม ปั๊ม

การออกแบบ ให้ flux density ในแกนเหล็กมีค่าต่ำ และ การออกแบบให้พัดลมและปั๊มมีรอบต่ำ จะทำให้เสียงลดลงได้แต่จะต้องลงทุนสูงขึ้น

2.11 accessories

อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของหม้อแปลงได้แก่

- อุปกรณ์เกี่ยวกับการควบคุมแรงดัน
 - no load tap changer
 - on load tap changer
- อุปกรณ์เกี่ยวกับการควบคุมความร้อน
 - radiator and conservator
 - cooling fan
 - cooling pump

- temperature controller
- อุปกรณ์เกี่ยวกับระบบป้องกันตัวเอง (self protection)
 - buchholtz relay
 - sudden pressure relay
 - sudden pressure relief
 - winding temperature
 - oil temperature
- อุปกรณ์เกี่ยวกับสัญญาณเตือนภัยต่างๆ

2.12 การใช้หม้อแปลงให้คุ้มค่า

ในการลงทุนมีความจำเป็นต้องพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น การพิจารณาว่าจะซื้อหม้อแปลงขนาดเท่าไรจึงจะเหมาะสมกับ load ในกรณีหม้อแปลงเกิดเสียหายควรซื้อทดแทนหรือซ่อม หรือเวลาใดควรเปลี่ยนพิกัด(capacity) ของหม้อแปลงให้เหมาะสมกับ load ที่กำลังเพิ่มขึ้น เป็นต้น ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นมักจะพิจารณาจาก

- เงินก้อนที่ลงทุน ในที่นี้คือราคาหม้อแปลง
- ค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายเนื่องจาก transformer losses ซึ่งตลอดอายุการใช้งานอาจมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าราคาหม้อแปลง

ค่าใช้จ่ายในการ operating และ maintenance มักจะไม่ได้นำมาพิจารณาในช่วงแรก เพราะน้อยกว่าค่าใช้จ่ายที่กล่าวมา

2.12.1 ค่าใช้จ่ายเนื่องจาก losses

พลังงานที่สูญเสียในหม้อแปลงแบ่งเป็นสองชนิด

- no-load loss เกิดจากแกนเหล็ก ความสูญเสียชนิดนี้อาจกำหนดให้มีค่าคงที่ในขณะที่หม้อแปลงถูก energized
- load loss ความสูญเสียชนิดนี้จะเปลี่ยนแปลงตาม กระแสยกกำลังสอง : I^2

การคิดเรื่องราคาค่า losses อาจคิดได้ สองแบบ

- คิดว่ามีค่าใช้จ่ายเท่าไรในการผลิตและส่งไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟให้ losses ที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน
- คิดว่าต้องเสียเงินซื้อกระแสไฟฟ้าเท่าไรในส่วนของ losses ที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน

ราคาค่า losses ของผู้ผลิต จะไม่อยู่บนพื้นฐานเดียวและเท่ากับราคาค่า losses ของผู้ซื้อไฟเนื่องจากต้นทุน unit price ไม่เท่ากัน

no-load loss ซึ่งให้มีค่าคงที่ตลอดเวลาที่ energize หม้อแปลง จึงไม่ยุ่งยากในการหาค่าตลอดการใช้งาน ซึ่งอาจให้ค่ากระแสไฟฟ้าแปรตาม inflation rate ในแต่ละปี และคำนวณกลับเป็นค่าปัจจุบัน (present worth) ด้วยอัตราดอกเบี้ยต่อปี

load losses ที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานจะซับซ้อนกว่า เพราะในแต่ละวัน load ไม่คงที่และเพิ่มขึ้นเป็นระยะๆ ตลอดการใช้งาน ถ้าเป็นส่วนของผู้ซื้อจะมีเรื่องราคาค่าไฟในแต่ละช่วงเวลาและหรือมี demand charge เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งต้องคำนวณแต่ละเวลาให้เหมาะสม ส่วนผู้ผลิตถ้าเฉลี่ยราคาผลิตเท่ากันตลอดวันอาจใช้วิธี average เพื่อหา load factor หรือ losses factor นอกจากนั้นต้องพิจารณาการเพิ่มของ load ในแต่ละปีด้วย เช่นเดียวกันต้องทำเป็นค่าปัจจุบันและรวมกับส่วนที่เกิดจาก no-load loss เป็นค่าใช้จ่ายรวมที่ต้องลงทุนในเรื่อง losses ตลอดการใช้งาน

2.12.2 การตัดสินใจลงทุนซ่อมหรือเปลี่ยนใหม่ (repair or replace)

ในเวลาที่หม้อแปลงเสียหายจำเป็นต้องตัดสินใจเรื่องการลงทุนว่าสมควรซ่อมหรือเปลี่ยนหม้อแปลงใหม่ จึงต้องใช้ข้อมูลพิจารณา คือ ค่าใช้จ่ายเรื่อง losses ของทั้งลูกเก่าและใหม่ ราคาค่าซ่อมลูกเก่าและราคาหม้อแปลงใหม่ รวมค่าใช้จ่ายของแต่ละลูกแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เรื่องช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณอาจเป็นปัญหายุ่งยากเพราะลูกเก่าที่ซ่อมเสร็จจะมีอายุที่เหลือสั้นกว่าลูกใหม่ ในการพิจารณาเปลี่ยนหม้อแปลงก่อนหมดอายุก็มีความยุ่งยากเรื่องช่วงเวลาเช่นเดียวกัน

2.12.3 อายุฉนวน (insulation life)

ทั่วไปอายุการใช้งานของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับอายุของฉนวนกระดาษที่ใช้พันลวดตัวนำ เพราะสัมผัสกับลวดตัวนำที่เป็นแหล่งกำเนิดของความร้อนโดยตรงและใกล้ที่สุด ความร้อนจะทำให้กระดาษสูญเสียความแข็งแรงทางกล (mechanical strength) เวลาที่หม้อแปลงหมดอายุการใช้งานคือ ไม่สามารถทนแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดกระแสลัดวงจรแม้ว่ายังคงมีสภาพความเป็นฉนวนดี

ตัวอย่างใน ANSI std. กำหนดอายุของฉนวนที่ทำจาก cellulose เช่น ฉนวนกระดาษ ว่า

“ ในกรณีที่หม้อแปลงจ่าย load มีค่าอุณหภูมิของขดลวดเฉลี่ย (average winding temperature) เท่ากับ 95°C (กรณีใช้ insulation class 105) หรือ 105°C (กรณีใช้ insulation class 120) ตลอดเวลา หม้อแปลงจะมีอายุการใช้งานเท่ากับ 6.5×10^4 ชั่วโมง (ประมาณ 7.4 ปี) ”

การจ่าย load จะมีลักษณะเป็น dairy load ไม่เท่ากันทั้งวัน อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมก็ไม่คงที่ ตลอดจนอุณหภูมิแต่ละฤดูกาลไม่เท่ากัน จึงมีสภาพที่มีทั้งอุณหภูมิที่สูงกว่าและต่ำกว่า อายุการใช้งานจึงยาวกว่า และอาจใช้ได้ยาวนานกว่า 30 ปี การ loading มีข้อจำกัดบางประการคือ อุณหภูมิของน้ำมันไม่ควรเกิน 120°C และ hottest spot ของลวดตัวนำไม่เกิน 140°C overload ไม่ควรเกิน 200%

ขอแนะนำให้ศึกษา ข้อแนะนำการจ่าย load ของหม้อแปลง 'loading guides for oil-filled transformer' ของมาตรฐาน IEEE/ANSI std. หรือ IEC std. ประกอบจะเข้าใจมากขึ้น

2.13 การติดตั้งและบำรุงรักษา

2.13.1 การติดตั้งหม้อแปลง

ในที่นี่จะกล่าวถึงเฉพาะการติดตั้งหม้อแปลง power transformer

- ควรมีการตรวจสอบทั่วไป (visual inspection) ภายนอกเมื่อหม้อแปลงมาถึงท่าเรือ arrival check ด้วยการ inspection ก่อนที่จะยกขึ้นท่า (unloading) อ่านค่าความดันไนโตรเจนที่บรรจุมา ต้องยังคงแสดงค่าเป็นบวก วัดความชื้นภายในหม้อแปลงด้วย dew point meter ตรวจสอบความเสียหายภายนอกเช่น มีรอยกระแทกเกิดขึ้นหรือไม่ และดูข้อมูล shock recorder ที่บันทึก เปลี่ยน battery ในเครื่อง shock recorder
- ตรวจสอบด้วยวิธีเดียวกันหลังจากขนมาถึงสถานที่ติดตั้ง และหลังนำขึ้นวางบนแท่น
- ตรวจสอบ part ต่างๆ ที่จะใช้ติดตั้ง เช่น bushing, radiator และ accessories
- ตรวจสอบสภาพฉนวน condenser type bushing ด้วยวิธี dielectric loss measurement (tan delta) แล้วเทียบกับผลทดสอบของผู้ผลิต (ถ้ามี)
- ตรวจสอบสภาพภายในหลังจากเปิด cover plate เพื่อติดตั้ง bushing และควรตรวจสอบให้มากที่สุด ต้องระวังว่าภายในบรรจุด้วย dry air ไม่ใช่ ก๊าซไนโตรเจน เวลาที่ตรวจสอบควรสั้นที่สุดเพื่อป้องกันความชื้นซึมเข้าผิวของฉนวนลึกลงไป
- ประกอบ bushing, radiator, conservator, cooling fan, control cubicle, และ accessories
- บางกรณีต้องมีการปลดอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อการขนส่ง เช่น lock อุปกรณ์ชุด OLTC ซึ่งต้องศึกษาคู่มือของ OLTC
- กรณีที่มี hot line oil filter ของ OLTC ต้องเปิดตรวจสอบและต้องติดตั้ง filter และ สารที่ใช้ดูดความชื้นในน้ำมัน
- ตรวจสอบสภาพฉนวนของ core ในกรณีที่มีการออกแบบให้สามารถปลดสายที่ต่อลงตัวถังได้จากภายนอก, ของขดลวดทั้งหมดเทียบกับ ground ด้วย insulation resistance meter (megger ohm meter) แล้วเทียบกับผลทดสอบของผู้ผลิต (ถ้ามี)
- วัด voltage ratio ทุก tap
- วัดค่า exciting current ด้วย low voltage แล้วเทียบกับ ผลทดสอบของผู้ผลิต (ถ้ามี)
- วัดค่า winding resistance
- วัดค่า dielectric loss ทั้งตัวก่อนเติมน้ำมัน
- ทำการปั๊มอากาศออกจากถัง (vacuum) เพื่อเติมน้ำมันเข้าภายใต้สภาพสุญญากาศ และทดสอบหารอยรั่ว ให้ระวังห้อง OLTC ซึ่งอาจต้องทำการต่อท่อระหว่าง main tank และห้องของ OLTC ให้ถึงกัน เพื่อป้องกันห้อง OLTC เสียหายเนื่องจากแรงดันในถังต่ำกว่า และรวมถึงถุงยาง (rubber bag) ที่อยู่ภายใน conservator tank

- ควรต่อท่อ vacuum จาก pump เข้าที่ valve บนใต้ cover plate (ไม่ควรต่อเข้าที่ valve ของ conservator tank) จะไม่เกิด condense เป็นหยดน้ำตกอยู่ภายใน conservator tank (สำหรับหม้อแปลงเก่าจะเกิดน้ำกลั่นตัวตกค้างอยู่ภายในมาก)
- รักษาระดับ vacuum pressure ไว้ก่อนเติมน้ำมันด้วยเวลาที่ผู้ผลิตแนะนำ
- ทำการ purify น้ำมัน วัดค่า dielectric strength ต้องมีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับผู้ผลิต กำหนด โดยคำนึงถึงอุณหภูมิของน้ำมันและมาตรฐานการทดสอบ
- หลังจากได้เวลา จึงเติมน้ำมันเข้า tank
- ตรวจสอบหารอยรั่ว โดยใช้ dry air หรือ ก๊าซไนโตรเจนใส่เข้าที่ conservator ด้วย ความดันไม่เกิน 0.3 bar เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.
- เมื่อน้ำมันเย็นแล้วให้วัดค่า dielectric ของน้ำมันอีกครั้ง
- วัด insulation resistance ของขดลวด
- วัดค่า dielectric loss ของขดลวดกับถัง และขดลวดกับขดลวด และของน้ำมัน
- ตรวจสอบการเดินสาย (wiring) ของชุด ควบคุม ระบบป้องกัน และระบบเตือนภัย
- ตรวจสอบการทำงานของ OLTC, cooling, ระบบป้องกัน ระบบเตือนภัย
- ตรวจสอบตัว breather, silica-gel
- การทำงานของ OLTC และ cooling fan
- เก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อทำ dissolved gas analysis เพื่อเป็น reference
- no-load energize เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 6 ชั่วโมง
- ตรวจสอบอุณหภูมิ เสียง การสั่น รอยรั่ว ระดับน้ำมัน
- พร้อมจ่าย load ได้

2.13.2 การบำรุงรักษาหม้อแปลง

ถ้าพิจารณาพื้นฐานของการออกแบบแล้ว ไม่จำเป็นต้องปลดหม้อแปลงออกจากระบบเพื่อ ทำการบำรุงรักษาบ่อยนัก อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องปลดเพื่อตรวจสอบและบำรุงรักษาบางอย่าง ควรหลีกเลี่ยงการเปิดหม้อแปลงเพื่อตรวจสอบสภาพภายใน ยกเว้นมีข้อมูลแสดงว่าเกิดความเสียหาย ขึ้นภายใน และได้พิจารณาอย่างรอบคอบแล้วว่า มีความจำเป็นต้องปลดเพื่อตรวจสอบ

การบำรุงรักษาแบ่งเป็น

2.13.2.1 การตรวจสอบประจำวัน

การตรวจสอบสภาพทั่วไป ส่วนใหญ่เป็น visual inspection สภาพหม้อแปลงทั่วไป

- ตรวจรอยรั่วซึมของน้ำมัน มองหาคราบน้ำมัน
- สภาพภายนอก bushing สีของถัง ภายในตู้ OLTC driving mechanism
- breather และ silica-gel ของ main tank และของ OLTC
- เสียงดังจากการทำงานที่ผิดปกติ ?

- มาตรฐานต่างๆ เช่น volt-meter amp-meter, temperature indicator, oil level gauge, tap-position indicator การตรวจสอบจะเป็น visual check เปรียบเทียบกันเอง เปรียบเทียบข้อมูลระหว่างช่วงเวลา

2.13.2.2 การตรวจสอบเป็นระยะ เช่น ทุก 6 เดือน/ 1ปี

การตรวจสอบสภาพภายในด้วย dissolved gas analysis : DGA เป็นการตรวจสอบ เพื่อให้ทราบถึงสภาพภายในหม้อแปลงขณะใช้งานโดยที่ไม่จำเป็นต้องปลดหม้อแปลงออกจาก ระบบ ความถี่ในการตรวจสอบขึ้นอยู่กับ ความสำคัญของหม้อแปลง และ capacity เช่น ทุกๆ 6 เดือน ทุกหนึ่งปี หรือในกรณีที่ตรวจพบว่ากำลังเริ่มเกิดความเสียหายขึ้นในหม้อแปลงอาจต้องทุก 7 วันหรือทุกวัน หลังเก็บน้ำมันที่ bottom valve ได้แล้ว ต้องรีบส่งให้ห้องปฏิบัติการตรวจวัดโดยเร็ว

ผลการตรวจวัดหาก๊าซ จะทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น

- มี hydrogen gas สูง และ มี hydrocarbon gas ต่ำ แสดงถึงเกิด partial discharge
- มี hydrogen gas สูง และ มี hydrocarbon gas สูง ยกเว้น acetylene gas แสดงว่า เกิด overheat ที่บริเวณจุดต่อ ถ้าจุดที่เกิดมีฉนวนกระดาษอยู่ด้วยก็จะพบ carbon dioxide gas สูงด้วย สัดส่วนของปริมาณ hydrocarbon gas ต่างๆ ที่นำมาจับคู่ เปรียบเทียบกัน จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิที่จุดนั้นได้
- มีก๊าซ เช่นเดียวกับกรณีที่เกิด overheat และพบ acetylene ด้วยแสดงว่าเกิด arc
- ก๊าซ carbon dioxide และ carbon monoxide เกิดขึ้นจากการใช้งานปกติ ฉนวน ประเภท cellulose เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นที่ลวดตัวนำขณะจ่าย load ความแม่นยำของเครื่องมือ วิธีการเก็บตัวอย่าง วิธีการวิเคราะห์ เป็นเรื่องสำคัญ

การวิเคราะห์จะใช้ พิจารณาจาก key gas, ratio method, ปริมาณก๊าซ, rate of increase, และเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซจากการวิเคราะห์ครั้งก่อน

น้ำมันจะเสื่อมสภาพในขณะที่ใช้งานเนื่องจากขบวนการ oxidation หากมีความชื้น และ อากาศผสมอยู่ในน้ำมันมากจะเกิดอย่างรวดเร็ว มีกรด และ sludge เกิดขึ้น สามารถสังเกตได้จาก น้ำมันเปลี่ยนสีจากสีใสเป็นสีเหลือง และน้ำตาลเข้มมากขึ้นเรื่อยๆ

การเปลี่ยนสารหล่อลื่น หรือจาระบี ในส่วนที่ต้องการสารหล่อลื่นต้องมีการเปลี่ยนตาม ระยะเวลา หรือตามจำนวนครั้งที่อุปกรณ์ทำงาน เช่น ชิ้นส่วนของ OLTC mechanism ชิ้นส่วนของ cooling fan เช่น bearing เป็นต้น แต่ควรทำทุก 6 เดือนหรือไม่เกิน 1 ปี

การ overhaul OLTC และ อุปกรณ์เครื่องกรองน้ำมัน ควรทำตามวิธีบำรุงรักษา และ ระยะเวลาที่ผู้ผลิตกำหนด พร้อมจดบันทึกรายละเอียดสภาพ contact เพื่อวางแผนการทำงานใน ครั้งต่อไป เช่นทุก 50,000 ครั้ง หรือทุก 5 ปี อาจรวมถึงการทาสี tank ใหม่บางส่วน และเปลี่ยนพวก ประเก็นของ cover และของขอบประตู control cabinet

การตรวจวัดหาปริมาณน้ำในน้ำมัน น้ำเป็นตัวที่ทำอันตรายต่อฉนวนประเภท cellulose คือ กระดาษ และ press board ทำให้ค่าความเป็นฉนวนลดลง และเร่งการเสื่อมสภาพ (ageing) ให้เร็วขึ้น ปกติน้ำจะเกิดจากการใช้งานด้วยขบวนการ oxidation ของฉนวน cellulose จึงจำเป็นต้องตรวจสอบว่าความชื้นยังอยู่ในระดับต่ำ มีวิธีการตรวจสอบหลายวิธี

แม้ว่าการตรวจวัดน้ำยังแสดงผลว่ามีน้ำอยู่ในระดับต่ำ แต่วิธีวัดจากน้ำมันใช้บอกเฉพาะปริมาณน้ำที่ละลายอยู่เท่านั้นจึงไม่สามารถบอกว่ามีน้ำรั่วเข้าเฉพาะตำแหน่งเป็น free water ปริมาณน้ำที่ละลายอาจแสดงค่าไม่สูงมาก แต่ฉนวนอาจจะขึ้นมาก ซึ่งต้อง dry out

มีเครื่องมือใช้ตรวจวัดหาปริมาณน้ำในปัจจุบันหลายอย่าง เช่น

- dew point measurement เป็นการบอกความชื้นที่ผิวของฉนวน ในกรณีที่มีหม้อแปลงเป็นชนิด nitrogen filled ในขณะที่เกิดสภาพสมดุล (equilibrium) คือ ความดันของความชื้นที่เป็น partial pressure ในก๊าซ จะเท่ากับ partial pressure ของความชื้นที่ผิวของฉนวน และของความชื้นในน้ำมัน จึงสามารถวัด dew point ของก๊าซเพื่อเทียบหาความชื้นในกระดาษ และในน้ำมันได้ การวัดด้วยวิธีนี้สามารถบอกแนวโน้มว่า มีน้ำสูงเกินกำหนดจนถึงระดับที่เป็นอันตรายกับหม้อแปลงหรือไม่
- oil test เช่นเดียวกัน ถ้าเป็นหม้อแปลงชนิด oil filled ในสภาพ equilibrium ความดันของความชื้นที่เป็น partial pressure ในน้ำมัน จะเท่ากับ partial pressure ของความชื้นที่ผิวของฉนวน การวัดหาความชื้นในน้ำมันด้วยวิธี Karl Frischer สามารถนำมาหาค่าความชื้นในฉนวนได้เช่นเดียวกัน

มีข้อเสนอแนะว่าการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบควรเก็บขณะที่หม้อแปลงมีอุณหภูมิร้อน เพราะน้ำในฉนวนจะออกมาละลายในน้ำมันมากกว่าในขณะที่หม้อแปลงเย็น

- insulation resistance วิธีนี้ใช้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่า ก่อน และหลัง dry out หรือบอกแนวโน้มว่ามีปัญหาเรื่องความชื้น การวัดค่าหาที่หนึ่ง เทียบกับ นาที่ที่ลึบ (PI: polarization index) ยังคงใช้ได้ในการตรวจสอบหม้อแปลงที่กำลังใช้อยู่ แต่ต้องระวังขดลวดชุดที่มี OLTC ต่ออยู่ เพราะค่าที่ได้มีผลจากคุณภาพของ OLTC ด้วย
- dielectric loss tangent ค่า tan delta ของฉนวนที่ดี/แห้งที่อุณหภูมิช่วง 20 - 90°C จะมีค่าไม่ค่อนข้างคงที่ แต่ฉนวนที่ขึ้น ค่า tan delta ที่อุณหภูมิช่วง 20°C จะใกล้เคียงกับฉนวนดี แต่ที่ 90°C จะเปลี่ยนแปลงไปมาก การวัดวิธีนี้ก็เป็นการบอกถึงแนวโน้มวิธีต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของอุปกรณ์ อุณหภูมิฉนวน ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการตรวจสอบ และ เครื่องมือ

บางวิธีสามารถทำได้โดยไม่ต้องปลดหม้อแปลง คือ วัดด้วย Karl Frischer ซึ่งสะดวก ความถี่ในการวัดควรมี ระยะเวลา 6-12 เดือน ขึ้นกับ capacity และความสำคัญของหม้อแปลง

การตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมัน น้ำมันจะเริ่มเสื่อมสภาพหลังจากเริ่มใช้หม้อแปลง เช่นเดียวกัน นอกจากการวัด dielectric strength แล้ว ควรตรวจสอบ สี ซึ่งจะบ่งบอกถึงระดับของการเสื่อมสภาพได้ ฉะนั้นขณะที่เก็บตัวอย่างน้ำมันทุกครั้งควรพิจารณา สีที่เปลี่ยนไปด้วย เพื่อตัดสินใจทดสอบอย่างอื่นเพิ่มเติม เช่น acid, oxidation inhibitor, interfacial tension, เป็นต้น

ภาคผนวก บทที่ 2

Magnetizing Inrush Current

ขณะที่ energize หม้อแปลง โดยที่ no load จะมีกระแส ที่เรียกว่า exciting current ซึ่งประกอบด้วยกระแสส่วนที่สร้าง induced flux เรียกว่า magnetizing current และกระแสส่วนที่จ่ายให้ core loss

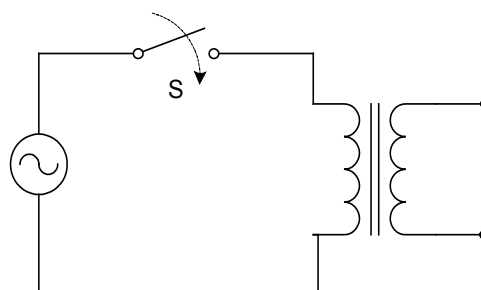
- magnetizing current จะตั้งฉากกับ induced voltage และ นำหน้า lead อยู่ 90°
- กระแสส่วนที่จ่ายให้ core loss จะ in phase กับ supply voltage
- induced voltage จะตรงข้าม (out of phase 180°) กับ supply voltage
- กระแส magnetizing current จะ in phase กับ induced flux
- กระแส exciting current จะนำหน้า induced voltage อยู่มากกว่า 90°
- หม้อแปลงลูกใหญ่ๆ หรือมี capacity สูง กระแส $I_e \cong I_m$

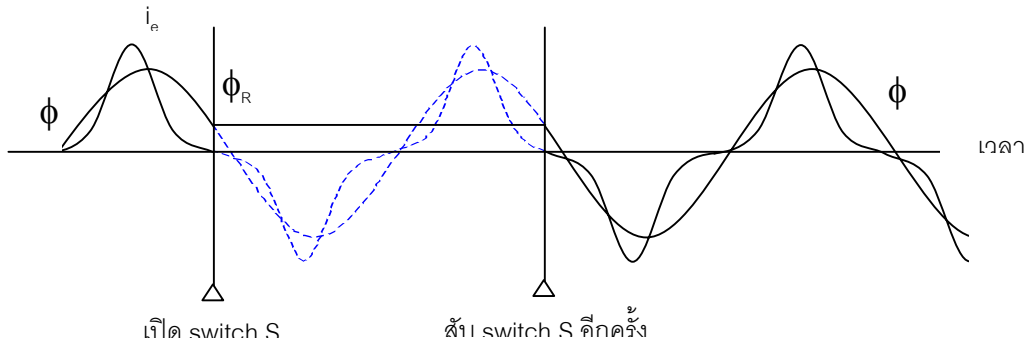
เมื่อ energize หม้อแปลงครั้งแรก จะเกิด transient magnetizing inrush current ไหลจาก source ไปยัง winding ชุดที่ energize จะมีปริมาณสูงหลายเท่าของ normal rated current ปริมาณ และเวลาที่ inrush current ไหลในวงจร energizing จะขึ้นกับหลายอย่าง เช่น

- ขนาดของหม้อแปลง
- resistance ของ energizing circuit : system resistance, winding resistance, core loss
- ขนาดของ system
- ชนิดของเหล็กที่ใช้ทำแกนซึ่งหมายถึงลักษณะของ saturation curve
- remanence flux
- ลักษณะการ energize ที่มุมต่าง ๆ ของ power source voltage

Inrush current

ลองพิจารณาจากรูป



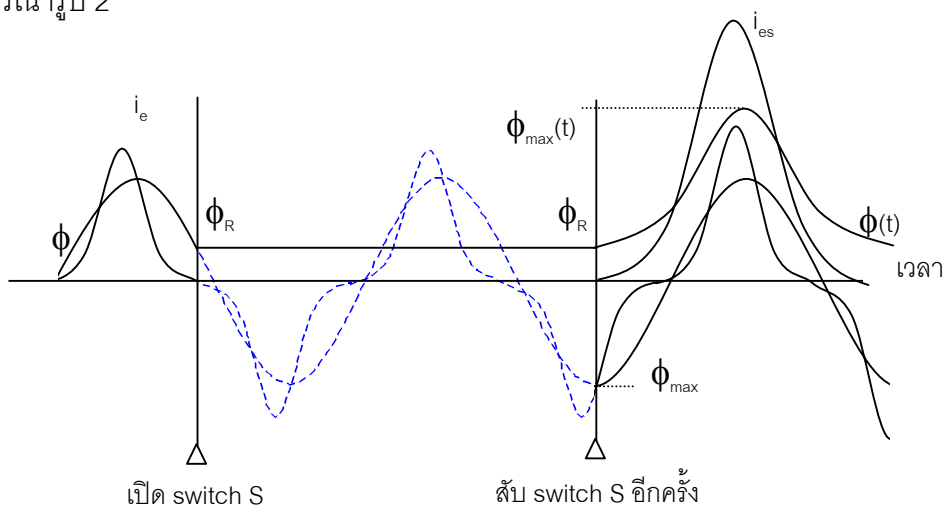


รูปที่ 1

เมื่อหม้อแปลงถูก energize เป็นเวลานานจน magnetizing current เข้าสู่สภาวะปกติ จากความสัมพันธ์ flux กับ ampere-turn ตาม B-H curve จะได้ magnetizing current ที่ผิดรูปร่าง (distort) ไปจาก sinusoidal wave ขณะที่ flux มีรูปร่างใกล้เคียงหรือเป็น sine wave เมื่อเปิด switch S ตรงตำแหน่งในรูป เป็นจังหวะที่กระแส magnetizing i_e เป็นศูนย์ แต่ flux ที่เกิดตาม magnetize hysteresis loop จะยังคงมีค่า ϕ_R ตกค้างอยู่ในแกนเหล็ก (remanence flux) ถ้าเวลาผ่านไปสับ switch S อีกครั้ง ในจังหวะที่ wave form ของ แรงดันของ source ให้ความสัมพันธ์ของ flux เท่ากับ remanence flux ϕ_R (เนื่องจาก ϕ จะ lead induce voltage อยู่ 90° : $e = -d\phi/dt$) จะเกิดกระแส และ flux ต่อเนื่องไปอย่างปกติ เพราะตามธรรมชาติ flux จะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ไม่ได้ เมื่อสับ switch S เป็นการ energize ที่ความสัมพันธ์ของ กระแส และ flux ขณะสับพอดี เหมือนกับขณะปลด มีแรงดันที่เกี่ยวข้องขณะสับเหมาะสม

อย่างไรก็ตามขณะสับ switch S ในทางปฏิบัติไม่สามารถเลือกจังหวะให้เหมาะสมได้ จึงไม่สามารถควบคุมหรือหลีกเลี่ยง transient inrush current ได้

ลองพิจารณารูป 2



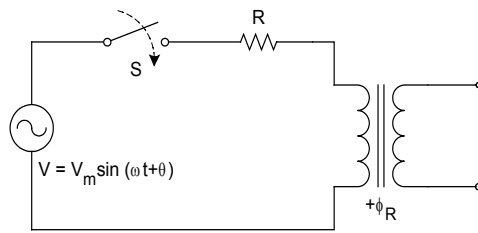
รูปที่ 2

หากการสับ switch S เพื่อ energize ในจังหวะที่แรงดัน energize มีผลให้ flux ในสถานะปกติที่เป็น peak ด้านลบ : $-\phi_{max}(t)$ ในจังหวะนี้ remanence flux ซึ่งเป็นบวกตามสภาพขณะเปิด switch S ในรูป จากที่อธิบายแล้วว่า flux จะไม่สามารถเพิ่มหรือลดได้ในทันทีทันใด ฉะนั้น flux จะเริ่มเพิ่มขึ้นจากตรง flux ที่เหลืออยู่ในแกน ϕ_R แทนที่จะเริ่มจาก $-\phi_{max}(t)$ แล้วเพิ่มขึ้นไปตามเส้นปะที่แสดงในรูป รูปร่างของ flux จะมีลักษณะเป็น $-\phi(t)$ curve ซึ่งจะแตกต่างไปจาก sine wave ที่ oscillate บนแกนศูนย์ และไม่เป็นที่ไปตาม B-H curve

ตามทฤษฎีจะได้ค่า ϕ_{max} ที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ $2\phi_{max} + \phi_R$ ปริมาณนี้จะเป็นได้ทั้งด้านบวกและลบ จะเห็นได้ว่า flux ที่เกิดจากการ สับ switch S เพื่อ energize มีค่า maximum เป็น 2 เท่าของ ϕ_{max} ปกติ เพราะ flux จะต้องเริ่มจากสถานะภาพเดิมที่มีอยู่ในแกนก่อนเสมอ จะเปลี่ยนจาก ϕ_R เป็น $-\phi_{max}$ ขณะสับที่ $t=0$ ไม่ได้ ชั้นแรกต้องสร้าง di/dt เพื่อให้เกิดแรงดันเท่ากับ source (เช่นเดียวกันกระแสก็เหมือนกับ flux คือเปลี่ยนทันทีทันใดไม่ได้)

กระแสที่สร้าง flux จึงเกิดเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 จะเป็นกระแสที่มี oscillation frequency เท่ากับระบบ และส่วนที่ 2 เป็น DC component ซึ่งจะมีรูปร่างเป็น exponential มี time constant เป็น L/R กระแสทั้ง 2 ส่วนจะสร้าง flux ให้ oscillate โดยเริ่มต้นจาก remanence flux เมื่อ flux รวมมีค่าถึง saturation ของ core จะทำให้กระแส inrush พุ่งขึ้นสูงมาก (ตามรูป) ค่า time constant ของวงจร L/R จะไม่คงที่ เนื่องจากการ saturation ของ core

ในช่วง 2-3 cycles แรก จะเกิด saturation ขึ้นสูงมาก ทำให้ค่า L มีค่าต่ำลง จึงทำให้ resistance ของวงจรเป็น loss damp วงจรให้กลับสู่ปกติได้เร็ว เมื่อสภาพ saturation น้อยลง L ก็เพิ่มขึ้น ทำให้ time constant สูงขึ้น สำหรับหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่มา ๆ ปริมาณ inrush ลดลงสู่ปกติจะใช้เวลานาน



$$L \frac{di}{dt} + iR = v$$

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = NI$$

$$H = \frac{NI}{h} \Rightarrow B = \frac{\mu NI}{h} \Rightarrow \phi = A \cdot \frac{\mu NI}{h}$$

$$\dot{\phi} = k i$$

Complementary Function

$$L \frac{di}{dt} + iR = 0$$

$$kL \frac{d\phi}{dt} + k\phi R = 0$$

$$\frac{1}{\phi} d\phi = -\frac{KR}{kL} dt = -\frac{R}{L} dt$$

$$\phi = C_1 e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$\phi_T = -\frac{V_m}{k\omega L} \cos(\omega t + \theta) + C_1 e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$t = 0, \phi = \phi_R$$

$$\text{Let } t = 0, \phi_R = -\frac{V_m}{k\omega L} \cos(0 + \theta) + C_1$$

$$\text{If } -\frac{V_m}{k\omega L} = -\phi_{\max}$$

$$\phi_R = -\phi_{\max} \cos\theta + C_1 \Rightarrow C_1 = \phi_R + \phi_{\max} \cos\theta$$

$$\phi_T = -\phi_{\max} \cos(\omega t + \theta) + (\phi_R + \phi_{\max} \cos\theta) e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$\text{At } \omega t = \pi \text{ and } \theta = 0$$

$$\begin{aligned} \phi_T &= -\phi_{\max}(-1) + (\phi_R + \phi_{\max}) \text{ whereas } e^{-\left(\frac{R}{L} \cdot \frac{\pi}{\omega}\right)} \approx 1 \\ &= 2\phi_{\max} + \phi_R \end{aligned}$$

$$L \frac{di}{dt} + iR = V_m \sin(\omega t + \theta)$$

$$\text{If } R \ll L$$

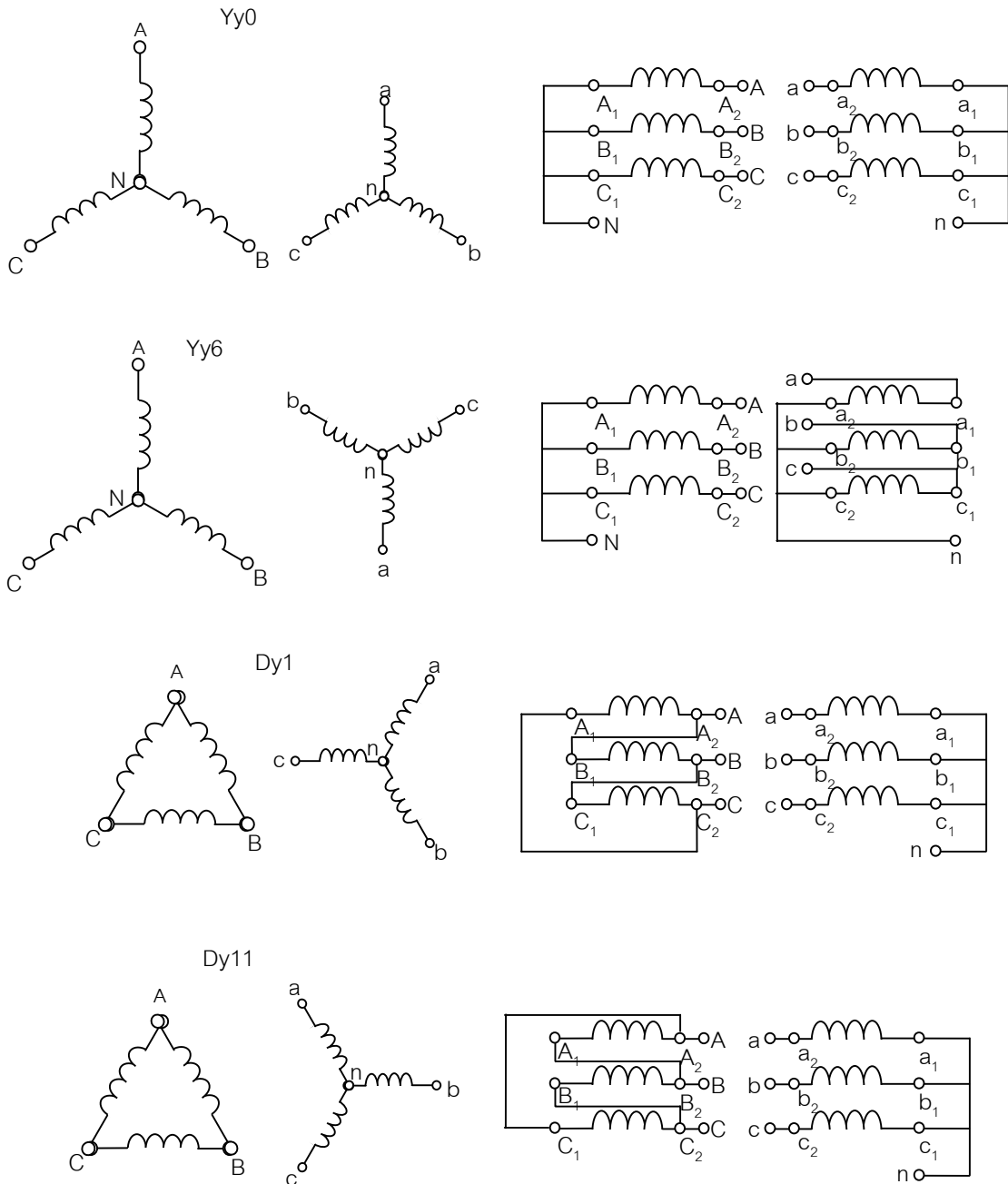
$$L \frac{di}{dt} = V_m \sin(\omega t + \theta)$$

$$kL d\phi = V_m \sin(\omega t + \theta) dt$$

$$d\phi = \frac{V_m}{kL} \sin(\omega t + \theta) dt$$

$$\phi = -\frac{V_m}{k\omega L} \cos(\omega t + \theta)$$

ตัวอย่างการต่อขดลวด



การต่อชนิด Dy5 ก็คล้ายกับ Dy11 เพียงแต่ต่อปลายอีกด้านหนึ่งของขดชุด secondary ที่ตรงกันข้ามกับการต่อของ Dy11 เข้าด้วยกันเพื่อทำเป็น neutral ของด้าน wye ก็จะได้ Dy5

ไม่สามารถนำหม้อแปลงที่มี phasor ต่างกันมาขนานกันได้ทุกตัว

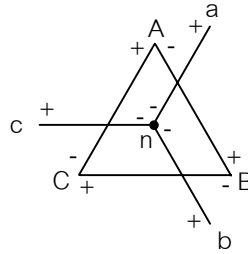
วิธีต่อขดลวดของ หม้อแปลงตามลักษณะ vector group ต่าง ๆ

หม้อแปลงทั่วไปจะถูกกำหนดให้มีลักษณะ 3 ประการ ที่จะใช้เป็นข้อมูลในการพิจารณา การต่อขดลวด

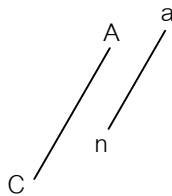
1. ขดลวดชุด primary และ secondary จะอยู่บนแกนเดียวกัน
2. แรงดันของทั้งสองชุดจะมี induced e.m.f. ที่ in-phase กัน และมี subtractive polarity
3. แรงดันทั้ง 3 phase เท่ากัน มีมุมห่างกัน 120° ตามลำดับ มี rotation ไปในทิศทางเดียวกัน

ตัวอย่างการต่อ เช่น หม้อแปลง Dy1

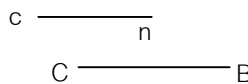
1. เขียนสัญลักษณ์ลักษณะของ Dy1 โดยมี rotation ทวนเข็มนาฬิกา พร้อมกำหนด polarity + และ - ตามข้อ 2



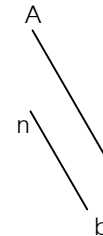
2. กำหนด ขดลวดที่อยู่บนแกนหรือ leg เดียวกันมี vector ขนาดกัน



ขดลวดชุดที่อยู่ใน leg A

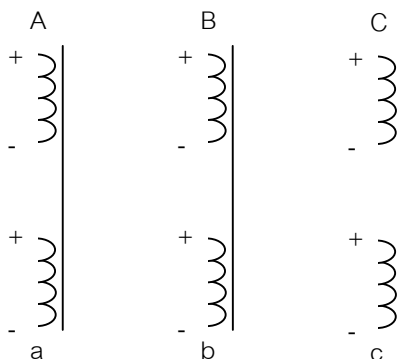


ขดลวดชุดที่อยู่ใน leg C



ขดลวดชุดที่อยู่ใน leg B

3. เขียนขดลวดชุด primary และ secondary ที่พันอยู่บนแกนเดียวกัน พร้อม polarity และ terminal



4. ต่อขดลวดแต่ละชุดของ primary ตาม leg และ polarity ของ vector diagram ตามรูป ข้อ 1

- ขดลวด ' A '

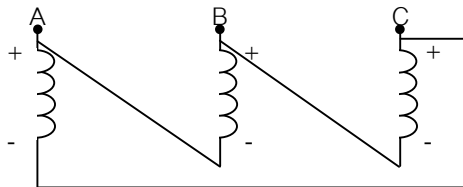
ใน leg A จะต่อปลายขดด้าน + ไปที่ terminal และ ต่อกับปลายขดลวด ' B ' ใน leg B ด้าน -

- ขดลวด ' B '

ใน leg B จะต่อปลายขดด้าน + ไปที่ terminal และ ต่อกับปลายขดลวด ' C ' ใน leg C ด้าน -

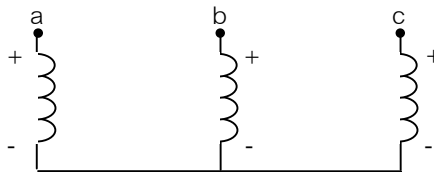
- ขดลวด ' C '

ใน leg C จะต่อปลายขดด้าน + ไปที่ terminal และ ต่อกับปลายขดลวด ' A ' ใน leg A ด้าน -



5. ต่อขดลวดแต่ละชุดของ secondary

ต่อ ขดลวดทุกชุดด้านที่มี polarity ลบ - เข้าด้วยกันและต่อด้านบวก + เข้าแต่ละ terminal ตาม leg



การเขียน vector diagram จากรูปการต่อขดลวดก็สามารถใช้ขั้นตอนย้อนกลับ เริ่มต้นจาก polarity เป็นอันดับแรกและเริ่มเขียน vector ตามรูปการต่อขดลวด โดยใช้ ข้อสมมติทั้ง 3 ข้อเช่นเดียวกัน

การขนานหม้อแปลง

การนำหม้อแปลงมาขนานกันเพื่อให้สามารถจ่าย load ได้มากขึ้น จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ต้องคำนึงถึง

- rated voltage เท่ากัน
- polarity เหมือนกัน
- voltage ratio เหมือนกัน
- tap voltage % tap voltage และ จำนวน tap ต้องเท่ากัน

- % impedance ที่ maximum MVA base เท่ากัน ในกรณีที่หม้อแปลงมี MVA ต่างกัน กระแสจะแบ่งไหลเข้าหม้อแปลงแต่ละตัวเป็นส่วนเดียวกันกับสัดส่วนของ MVA
- vector group เหมือนกัน

แต่บาง vector group ที่ไม่เหมือนกัน อาจขนานกันได้โดยเลือกต่อ secondary terminal ระหว่างหม้อแปลงเข้าด้วยกัน กรณีนี้รูปร่างของ vector จะเหมือนกันแต่ secondary terminal จะเลื่อนไปหนึ่งหรือสองตำแหน่งเช่น

กลุ่ม Dy1, Dy5 และ

กลุ่ม Dy7 Dy11

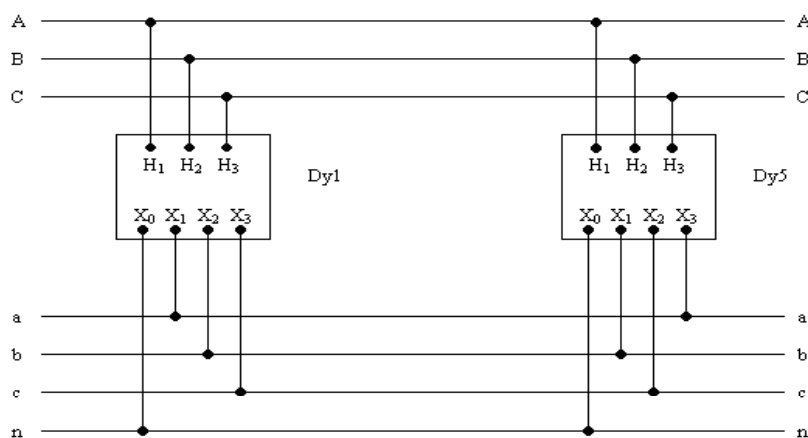
ตัวอย่างการต่อขนานหม้อแปลงที่มี vector group ต่างกัน

ต่อแรงดันเข้าที่ด้าน high side โดยไม่สลับ phase เช่น

Dy1 ขนานกับ Dy5

หม้อแปลง Dy1 : ต่อ แรงดัน A, B, และ C เข้า terminal H_{1_1} , H_{2_1} , และ H_{3_1} ตามลำดับ จะได้ phase rotation ทวนเข็มนาฬิกา ทำให้ secondary terminal x_{1_1} , x_{2_1} , และ x_{3_1} จะมี phase rotation ทวนเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน และ secondary e.m.f. มี phase displacement ตามหลัง primary e.m.f. อยู่ 30°

หม้อแปลง Dy5 : ต่อ แรงดัน A, B, และ C เข้า terminal H_{1_5} , H_{2_5} , และ H_{3_5} ตามลำดับ จะได้ phase rotation ทวนเข็มนาฬิกา ทำให้ secondary terminal x_{1_5} , x_{2_5} , และ x_{3_5} จะมี phase rotation ทวนเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน และ secondary e.m.f. มี phase displacement ตามหลัง primary e.m.f. อยู่ 150°



ต่อ x_{1_1} กับ x_{3_5} x_{2_1} กับ x_{1_5} และ x_{3_1} กับ x_{2_5}

จะเห็นว่า phase rotation และ phase displacement ของหม้อแปลงทั้งสองตัวเหมือนกัน

ต่อแรงดันที่ด้าน high side โดยสลับ phase เช่น

Dy11 ขนานกับ Dy5

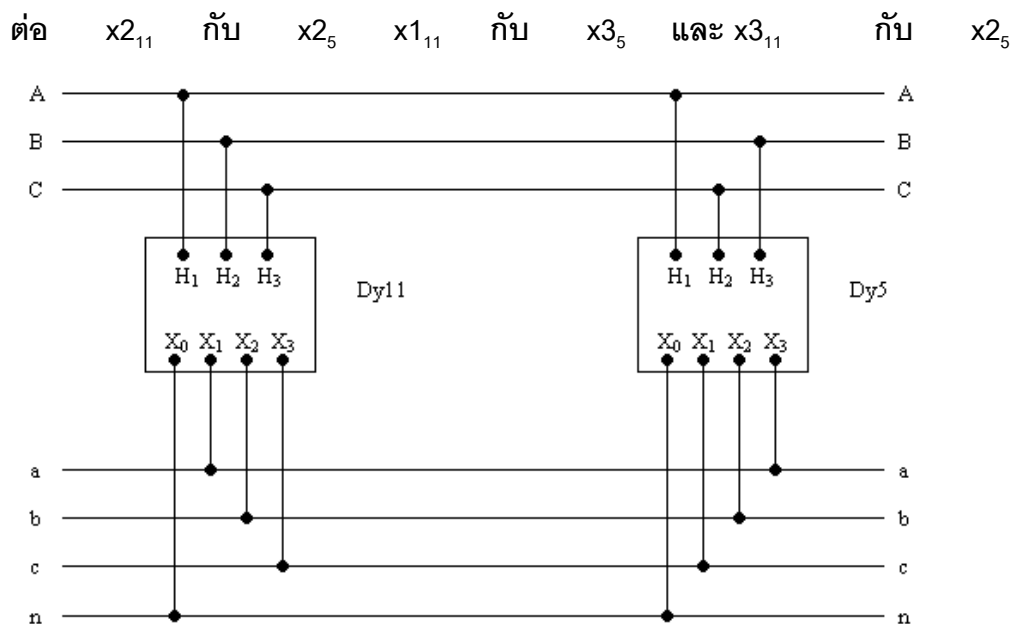
หม้อแปลง Dy11 : ต่อแรงดัน A, B, และ C เข้า terminal $H_{1,1}$, $H_{2,1}$, และ $H_{3,1}$ ตามลำดับจะได้ phase rotation ทวนเข็มนาฬิกา ทำให้ secondary terminal $x_{1,1}$, $x_{2,1}$, และ $x_{3,1}$ จะมี phase rotation ทวนเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน และ secondary e.m.f. มี phase displacement ตาม primary e.m.f. อยู่ 150° หรือนำหน้า primary e.m.f. อยู่ 30°

หม้อแปลง Dy5 : ต่อแรงดัน A, C, และ B เข้า terminal $H_{1,5}$, $H_{2,5}$, และ $H_{3,5}$ ตามลำดับจะได้ phase rotation ตามเข็มนาฬิกา ทำให้ secondary terminal $x_{1,5}$, $x_{2,5}$, และ $x_{3,5}$ จะมี phase rotation ตามเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน และ secondary e.m.f. มี phase displacement ตาม primary e.m.f. อยู่ 210° จะเห็นว่า

Dy11 มีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา b-phase ตาม A-phase อยู่ 90° และ

Dy5 มีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา b-phase ตาม A-phase อยู่ 90° เช่นกัน

เพื่อให้ phase rotation ของ low side ของ Dy5 มีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา จึงต้องสลับการต่อ terminal ดังนี้



หม้อแปลง Zigzag มีหลักการทำงานและมีประโยชน์อะไร

หม้อแปลง zigzag อาจมีขดลวดชุดเดียว หรือมีสองชุดแล้วแต่การใช้งาน

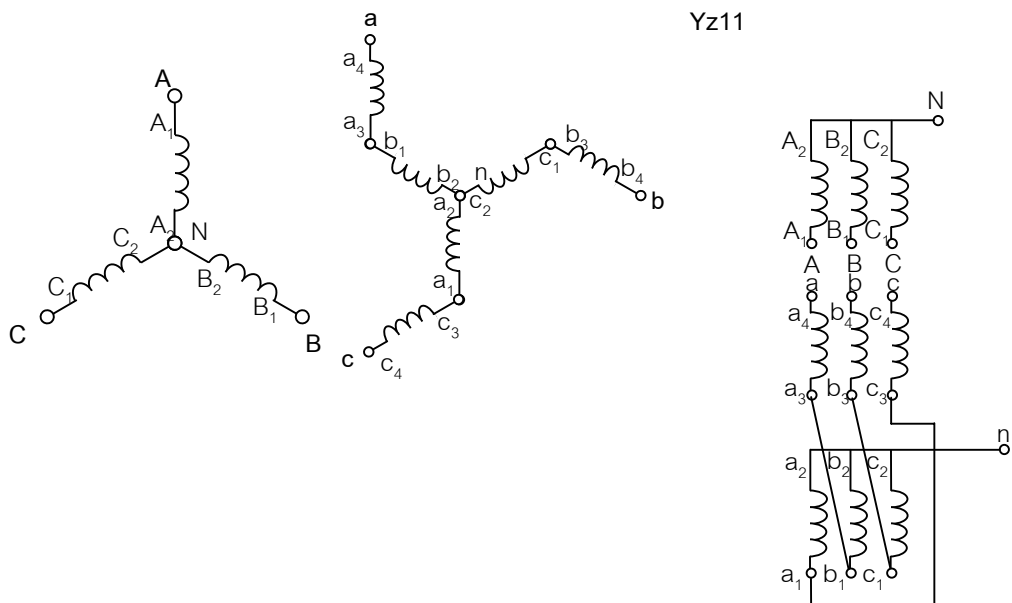
ที่มี bushing ด้านเดียว หรือกล่าวว่ามีขดลวดชุดเดียว จะมีขดลวดชุดหนึ่งที่เกิดจากการต่อขดลวดย่อยระหว่าง phase ภายใน ทำให้ขดชุดนี้มีจุดต่อเข้า bushing เพียง 4 จุด เพื่อต่อเข้ากับ line 3 จุด และ จุดที่เหลือต่อเข้ากับ neutral bushing เพื่อต่อลงดิน (ground)

ที่มี bushing สองด้าน หรือมีขดลวดสองชุด ด้านหนึ่งต่อแบบชนิดแรก และมี bushing อีกหนึ่งชุดต่อกับขดลวดที่ต่อภายในแบบปกติ wye หรือ delta

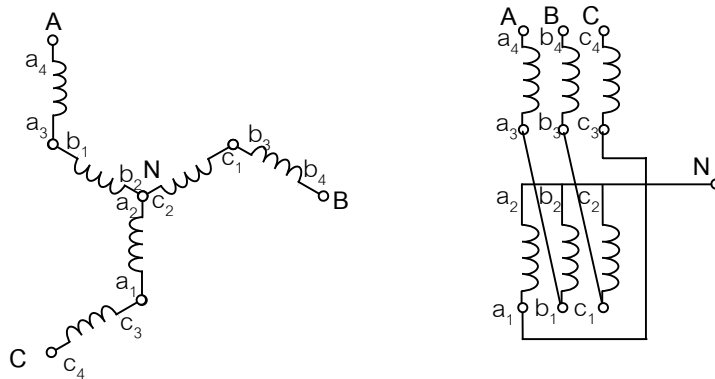
วัตถุประสงค์ที่ใช้หม้อแปลงแบบที่ขดลวดต่อเป็นแบบ interconnection หรือ zigzag อยู่สองอย่าง คือ

- ใช้เป็น grounding transformer จะมีขดลวดชุดเดียว วัตถุประสงค์ในการใช้งานเพื่อทำให้ระบบที่เป็น ungrounded system เช่น delta connected source สามารถมี ground ได้โดยใช้ grounding transformer นี้ ขณะเกิด line-ground ทำให้มี fault current สูงพอที่ protective relay สามารถทำงานได้ หรือพูดได้ว่า grounding transformer ทำหน้าที่เป็น path ของ zero sequence current ให้กับระบบ ungrounded ซึ่งมีการทำงานเหมือนหม้อแปลง Yd (wye-delta transformer)
- ใช้เป็นหม้อแปลงจ่าย load มีขดลวดสองชุด ซึ่งจะสามารถต่อขดลวดเป็น zigzag ได้ทั้งที่ขด primary หรือที่ขด secondary ตามแต่วัตถุประสงค์การใช้งานและการต่อลง ground ของ ระบบ

ลักษณะการต่อขดลวด



รูปแสดงการต่อขดลวดของหม้อแปลง Yz11



รูปแสดงการต่อขดลวดหม้อแปลง zigzag grounding transformer

การใช้หม้อแปลงที่ต่อแบบ Yz เช่น Yz1 หรือ Yz11 มีวัตถุประสงค์เพื่อลด third harmonic voltage ใน line และ ทำให้สามารถจ่าย unbalance loading ได้ มีผลเท่ากับ Dy connection จะใช้แทนหม้อแปลง Dy ในที่ที่มี short circuit current สูงเพราะ ขดลวดชุด Delta มีจำนวน turn มากและใช้ลวดเส้นเล็ก จึงไม่แข็งแรง หม้อแปลงชนิด Yz สามารถขนานกับหม้อแปลงชนิด Dy ได้

การใช้หม้อแปลงที่ต่อแบบ Zy มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้าง ground path ให้ ground current ทางด้าน primary (ungrounded source side) ในกรณีที่ต้องจ่าย unbalance loading มากๆ จำเป็นต้องมี tertiary winding ที่ต่อเป็น delta ไว้ด้วย

วิธีทำให้ฉนวนหม้อแปลงแห้ง Insulation Drying Methods

บทนำ ในหม้อแปลงไฟฟ้า จะมีส่วนที่เป็นกระดาษ (kraft paper), pressboard, ไม้ และ น้ำมัน ที่ทำหน้าที่เป็นฉนวน คุณสมบัติของความเป็นฉนวนจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่สะสมอยู่ในเนื้อฉนวน ฉนวนที่แห้งจะทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้สูง

กรณีฉนวนแห้งที่แห้งจะมีความสามารถรับแรงกลที่เกิดขึ้นขณะเกิดลัดวงจรได้หลายครั้ง ในที่นี้จะกล่าวถึงการ dry out ฉนวนของขดลวด และ ฉนวนที่เป็นส่วนประกอบในหม้อแปลง จนมีความชื้นเหลืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (0.5%) โดยใช้ความร้อน (heat) และ vacuum เป็นหลัก และทำความเข้าใจกับเครื่องมือต่างๆที่ใช้ในการประมาณค่าน้ำในฉนวน

การ Dry out

การ dry out เป็นกระบวนการทางความร้อน (heat process) ที่ดึงเอาสารที่ระเหยได้ออกจากวัตถุ ในที่นี้ คือน้ำที่อยู่ในฉนวนแห้ง กระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่าง dry out มี 2 กระบวนการ คือ

1. การทำให้น้ำที่ซึมอยู่บริเวณผิวของฉนวนระเหยออกมาโดยการใช้ความร้อนจากสภาพแวดล้อม เช่น ใช้อากาศร้อน หรือ น้ำมันร้อน
2. การนำเอาน้ำที่อยู่ลึกเข้าไปภายในเนื้อฉนวนออกมาที่บริเวณผิวของฉนวน และ ตามด้วยกระบวนการแรก

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการ dry out ฉนวนแห้ง จะได้จากสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบฉนวน โดย การนำ การพา หรือการแผ่รังสี หรือรวมกันทั้ง 3 อย่างในเวลาเดียวกัน

กระบวนการที่ 1 จะขึ้นอยู่กับ

อุณหภูมิรอบข้าง ความชื้นสัมพัทธ์ พื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศ หรือน้ำมัน และความดัน

กระบวนการที่ 2 ขึ้นอยู่กับ

ฉนวนแต่ละชนิด อุณหภูมิ และความชื้นที่อยู่ภายใน

การที่น้ำจะระเหยเป็นไอน้ำได้ต้องการความร้อนที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิให้น้ำร้อนจนถึงจุดเดือด และความร้อนแฝงแห่งการกลายเป็นไอ (latent heat) เพื่อเปลี่ยนน้ำให้เป็นไอน้ำ

สมดุลของความชื้น (Moisture Equilibrium)

เมื่อน้ำสัมผัสกับอากาศ หรือก๊าซแห้ง น้ำจะระเหยออกมาอยู่ในอากาศในรูปไอน้ำ (vapor) และ สร้างความดันไอน้ำ (partial vapor pressure) คือ ความดันเฉพาะส่วนของไอน้ำที่มีในอากาศ หรือก๊าซนั้น ความดันผลรวมของ partial vapor pressure และ partial gas pressure จะเป็น total pressure ที่กระทำบนผิวของวัตถุที่สัมผัสอากาศ หรือ ก๊าซนั้น

ค่า maximum ของ partial vapor pressure ที่อุณหภูมิใดๆ คือ สภาพที่มีความดันอิ่มตัวของไอน้ำ (saturated vapor pressure) ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน(P), ปริมาตร(V), อุณหภูมิ(T) และมวล(n) ของไอน้ำ จะเหมือนกับ ideal gas คือ $PV = nRT$

ถ้าพิจารณาจาก Piper chart จะแสดงว่าในภาชนะ/หม้อแปลง ณ อุณหภูมิหนึ่ง จุดที่มีสภาพสมดุลย์ของน้ำที่อยู่ในที่ต่างๆ คือ น้ำในฉนวนแข็ง น้ำในน้ำมัน และน้ำในอากาศหรือในก๊าซ จะมี partial vapor pressure เท่ากัน ซึ่งสามารถวัดค่า dew point ของก๊าซที่ความดันบรรยากาศ เพื่อเทียบหาค่าความชื้นในกระดาษ หรือในน้ำมันได้จาก chart หรือ วัดค่า relative humidity ในก๊าซ หรือ ตรวจหาปริมาณน้ำในน้ำมัน เพื่อเทียบหาค่าในกระดาษได้เช่นกัน เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ค่า partial vapor pressure ภายในฉนวนต่างๆ จะเปลี่ยนไปในทิศทางที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึงจุดคงที่แล้ว น้ำก็จะปรับสภาพสู่จุดสมดุลย์ใหม่

การให้ความร้อนจะต้องควบคุมไม่ให้สูงจนทำให้เกิดการ ageing ของฉนวนมากจนเป็นอันตรายกับฉนวน การ ageing ของฉนวนไม่ได้ขึ้นอยู่กับความร้อนอย่างเดียว แต่รวมถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในฉนวน ออกซิเจน และเวลาที่ใช้ในการ dry out หรือเวลาที่ฉนวนมีสภาพอุณหภูมิสูง

น้ำที่ละลายในน้ำมันหม้อแปลงในสภาพสมดุลย์

น้ำละลายในน้ำมันหม้อแปลงได้ไม่มาก เพราะน้ำมีความสามารถในการละลายในน้ำมันต่ำ (solubility of water) และขึ้นกับอุณหภูมิ จึงพบปริมาณน้ำที่ละลายในน้ำมันไม่มาก แต่ก็สามารถทำให้ความเป็นฉนวนของน้ำมันต่ำลงมาก และเสื่อมสภาพเร็วขึ้น น้ำในฉนวนกระดาษจะมีปริมาณสูงกว่าในน้ำมันมาก อย่างไรก็ตามน้ำที่อยู่ในฉนวนแต่ละชนิดจะมีปริมาณเล็กน้อย ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของฉนวนนั้นๆ ที่อุณหภูมิหนึ่งค่า saturation ของน้ำในน้ำมัน หรือ ปริมาณน้ำมากที่สุดที่สามารถละลายได้ จะระบุเป็น part per million (ppm) หรือ ระบุเป็น saturation vapor pressure ค่า vapor pressure ใดๆ ที่ต่ำกว่า saturation สามารถระบุได้เป็น relative saturation หรือ percent saturation ดังนั้นที่อุณหภูมิหนึ่งๆ สภาพสมดุลย์ระหว่างน้ำในน้ำมันและ น้ำในอากาศที่สัมผัสกันอยู่ จะมีค่า relative humidity percentage เท่ากัน เช่น ขณะที่อยู่ในสภาพสมดุลย์น้ำมันมีน้ำ 80% ของ saturation อากาศที่อยู่เหนือน้ำมัน สัมผัสกับน้ำมันอยู่ ก็จะมีสภาพ 80% ของ saturation เช่นเดียวกัน

ตัวอย่าง หากตรวจพบน้ำ 2 ppm ในน้ำมันที่มีอุณหภูมิ 30°C แสดงว่า relative saturation มีค่าเท่ากับ 2.5% หรือเท่ากับ $(2/80) \times 100$ เพราะที่อุณหภูมิ 30°C น้ำมันมีค่า saturation ของน้ำเท่ากับ 80 ppm หรือ จาก Piper chart ที่ 30°C น้ำในน้ำมัน 2 ppm มีค่า Vapor Pressure = 1 mm Hg ทำให้ทราบค่า saturation vapor pressure ที่ 30°C มีค่าเท่ากับ $(1/2.5) \times 100 = 40$ mm Hg

ลองพิจารณา vapor pressure equilibrium ในสภาพก่อน dry out ของหม้อแปลงที่เป็นชนิด sealed type ว่าสภาพสมดุลนั้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรตามอุณหภูมิ และทำความเข้าใจกับ Piper chart เช่น

กรณีที่ 1 ที่ 30 °C ส่วนที่เป็นอากาศ หรือ gas space วัดค่า dew point ได้ -36 °C เทียบจาก Piper chart ที่จุดสมดุล เราสามารถพบปริมาณน้ำในกระดาษมีค่าเท่ากับ 0.5 % และ น้ำในน้ำมันเท่ากับ 0.3 ppm ถ้าเราเพิ่มอุณหภูมิภายในหม้อแปลงไปที่ 60 °C น้ำในกระดาษจะออกมาละลายอยู่ในก๊าซและน้ำมันมากขึ้น หากสมมติว่าน้ำในกระดาษยังคงที่จะพบว่าที่สมดุลใหม่ น้ำในน้ำมันจะเพิ่มขึ้น เป็น 2 ppm และ dew point ของ gas space จะเปลี่ยนไปเป็น -15 °C

กรณีที่ 2 หม้อแปลงหลังซ่อมแล้ว และประกอบ core-coil ลง tank บรรจุอากาศหรือไนโตรเจนไว้มีน้ำมันอยู่ที่ก้น tank เมื่อตรวจวัดปริมาณน้ำในกระดาษก่อน dry out ที่อุณหภูมิ 25 °C พบว่ามี 5% เทียบจาก Piper chart จะพบว่า gas space มี dew point เท่ากับ 0 °C และมีน้ำในน้ำมันประมาณ 10 ppm ถ้าสมมติว่า gas space นั้นสามารถรองรับน้ำที่ออกมาจากกระดาษได้ไม่จำกัด เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิไปที่ 80 °C กระดาษจะมีน้ำเหลือเพียง 0.5%

กระบวนการ Dry Out Transformer

หลักการพื้นฐานของการ dry out คือ การทำให้สภาพสมดุลเปลี่ยนไป เวลาที่ใช้ในการ dry out จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในกระดาษ และแรงที่ใช้ในการขับน้ำออกมาจากกระดาษ แต่ถ้ากระดาษมีน้ำมันชุ่มก็จะใช้เวลานานกว่ากระดาษที่ไม่ได้ดูดซับน้ำมันไว้ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของขดลวด ตำแหน่งของฉนวนที่สัมผัสกับอากาศ ปริมาณของฉนวน (Volume) และความหนาแน่นของฉนวน อัตราของน้ำที่ออกจากกระดาษจะไม่เป็นสมการเชิงเส้นกับเวลา และเกี่ยวข้องกับ different pressure ของ vapor pressure ของน้ำที่อยู่ใน gas space และในฉนวน

วิธีการที่ใช้ในโรงงานผลิตหรือในโรงงานซ่อม

ถ้าสมมติว่าในโรงงานหรือโรงซ่อมที่อุณหภูมิ 20 °C สภาพฉนวนมีน้ำอยู่ 5% (ซึ่งปกติที่อุณหภูมินี้ฉนวนพวก cellulosic material จะดูดน้ำได้ถึง 20% เทียบกับน้ำหนัก) ดังนั้นฉนวนจึงมี relative humidity เท่ากับ 25% คือ $(5/20) \times 100$

ถ้าต้องการ dry out ให้เหลือ 0.5 % ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

ใช้ Dry Air ถ้าเราเก็บฉนวนนั้นไว้ใน tank หรือ container ที่บรรจุอากาศ และใช้วิธีกำจัดน้ำออกจากอากาศตลอดเวลาอย่างต่อเนื่อง เราจะพบว่าต้องใช้เวลานานมาก เนื่องจาก vapor pressure different ระหว่างน้ำในฉนวน และในอากาศไม่สูงมากพอที่จะเร่งให้น้ำในฉนวนออกมาได้อย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปเราสามารถผลิต dry air ที่มี dew point ประมาณ -40 °C หรือต่ำกว่าไม่

มาก ฉะนั้น differential pressure ที่ได้คือ 2.97 mm Hg คือ 3.0 (pressure ขณะ 5%) ลบด้วย 0.07 (pressure ขณะ 0.5%) หรือประมาณ 3 mm Hg (torr) เท่านั้น

ใช้ Heat หรือการเพิ่มอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับฉนวนทุกๆ 10 °C เราสามารถสังเกตเห็น vapor pressure เพิ่มขึ้น 2 เท่า ดังนั้นถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 80 °C เวลาในการ drying out ก็จะลดลงอย่างมาก เพราะเราจะมี different pressure ตอนเริ่มต้น dry out ประมาณ 200 mm Hg ในทางปฏิบัติ อาจใช้ลมร้อนที่แห้งอุณหภูมิ 80 °C เป่าผ่านขดลวดที่อยู่ในถังหม้อแปลงให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ แต่จะใช้เวลานานเป็นเดือน และเกิดการ ageing ของ insulation อย่างมาก

ใช้ Vacuum หรือใช้วิธีลดความดัน ถ้ามีเครื่อง vacuum pump ที่เหมาะสม จะสามารถสร้าง differential pressure ภายใน tank หรือในตู้อบให้สูงขึ้นได้ เพราะเวลาที่ดูดเอา gas ออกจาก tank หรือจากตู้อบ จะเป็นการนำเอาความชื้นออกมาด้วย ทำให้ vapor pressure ของน้ำใน gas space ต่ำลง อย่างไรก็ตาม vacuum เพียงอย่างเดียวคงสร้าง differential pressure ไม่แตกต่างไปจากวิธีการใช้วิธี dry air เท่าไรนัก เพราะการที่น้ำจะกลายเป็นไอได้ต้องการความร้อนแฝง (latent heat)

ใช้ Heat and Vacuum การใช้วิธีร่วมกัน ระหว่าง การเพิ่มอุณหภูมิพร้อมกับ vacuum เป็น cycle สลับกัน คือให้ความร้อนด้วย dry air หรืออบเพื่อให้ความร้อนกับฉนวน แล้วตามด้วย vacuum จะได้ผลดี อย่างไรก็ตามถ้าฉนวนมีน้ำมันชุ่ม การ dry out ด้วยวิธีนี้ก็ใช้เวลาพอสมควรเช่นเดียวกับการใช้วิธี hot oil circulation แล้ว drain น้ำมันออก ตามด้วย vacuum จะใช้เวลานานกว่าฉนวนที่มีสภาพไม่ชุ่มน้ำมันถึงประมาณ 5 เท่าเพราะน้ำมันที่ฉนวนดูดซับไว้จะเป็นตัวหน่วงเวลาที่น้ำจะระเหยออกมาอยู่ใน gas space ข้อสำคัญอีกอย่างหนึ่งเรื่องการใช้ heat and vacuum คือ กรณีหม้อแปลงเก่าที่มีความชื้นสูง ก๊าซ และไอน้ำที่ถูกดูดออกจาก tank ด้วย vacuum pump จะมีอุณหภูมิสูง เมื่อความดันสูงขึ้น และอุณหภูมิลดลงจะกลั่นตัวเป็นน้ำได้ ฉะนั้นจึงใช้ cold trapper เพื่อดักไว้ไม่ให้ไอน้ำไปควบแน่นที่ vacuum pump ฉะนั้นถ้าต่อท่อ vacuum เข้าที่ conservator tank จะเหมือนกับใช้ conservator tank เป็น trapper วิธีที่ถูกควรปลดท่อที่ต่อระหว่าง main tank กับ conservator tank ออก และปิดด้วย blind flange ติดตั้งท่อ vacuum เข้า valve ของ main tank ที่ด้านบน

ใช้ Vapor Phase ผู้ผลิตหม้อแปลงมักจะใช้วิธี 'vapor phase' heating ในโรงงานผลิต วิธีการจะแตกต่างจาก heat and vacuum ที่การให้ความร้อน จะใช้วิธีถ่ายความร้อนจาก hot solvent ไปที่ฉนวน และส่วนต่างๆ ภายในหม้อแปลง ซึ่งต้องการเครื่องมือพิเศษ เช่น vacuum tank, heat system, solvent, condenser และ vacuum pump กระบวนการคือ

- Heat Cycle ขึ้นส่วน core และ coil ที่มีฉนวนชนิดต่างๆ จะถูกนำเข้าไปภายใน vacuum tank หรือตู้อบใหญ่ หรือใน tank ของหม้อแปลงเอง vacuum pump จะดูดเอาอากาศออกจนถึง

แรงดัน 70 mm Hg ที่แรงดันนี้ boiling point ของ solvent จะมีค่า 100 °C solvent จะถูกทำให้ร้อนขึ้น และฉีดเข้าไปภายในห้อง vacuum ในลักษณะ super-heated liquid ซึ่งจะเดือดทันทีเมื่อมีแรงดันเท่าห้อง vacuum หรือจะใช้วิธีต้ม solvent ใน solvent tank ให้อุณหภูมิสูงขึ้น และลดแรงดันใน tank ลงจนมี pressure เท่ากับ 5 mm Hg จะเกิด vapor ขึ้น แล้วจึง pump เอา vapor เข้าไปภายใน vacuum tank เมื่อ vapor ของ solvent สัมผัสกับฉนวนและ core ที่เย็นกว่า จะเกิดการควบแน่น (condense) และถ่ายความร้อนให้กับส่วนต่างๆ ทำให้ความร้อนถูกถ่ายเทไปที่จุดต่างๆ ได้ทั่วถึง และรวดเร็ว เวลาที่ใช้ในช่วงนี้ประมาณ 10-20 ชั่วโมง ในช่วงเวลานี้จะใช้ vacuum pump อีกตัวหนึ่ง ซึ่งมี condenser ต่อรวมอยู่ด้วย ดูดเอา solvent และน้ำออกจาก vacuum tank ไอน้ำที่กลั่นตัวควบแน่นจะถูกแยกออกจาก solvent ด้วย gravity

- Vacuum Drying vapor ของ solvent จะถูกดูดออก และจะควบแน่นเนื่องจากอุณหภูมิลดลงที่ condenser ด้วยการใช้น้ำ vacuum pump อย่างต่อเนื่องจะทำให้ vacuum pressure ลดลงเหลือ 0.5 mm Hg ในขณะที่ฉนวนมีอุณหภูมิ 100 °C ซึ่งเมื่อเทียบกับ Piper chart จะเห็นว่าฉนวนมีความชื้นเหลือเพียง 0.1% เวลาที่ใช้ในการ dry out ประมาณ 1-4 วัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณฉนวน และระดับความชื้นที่ต้องการให้เหลืออยู่ในฉนวน

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ vacuum pump ที่นำมาใช้งานต้องมี ultimate pressure ต่ำกว่า vapor pressure ของน้ำที่มีสภาพสมดุลกับปริมาณน้ำที่เหลือในกระดาศที่อุณหภูมิขณะ dry out เช่น ถ้า dry out ด้วยอุณหภูมิ 50 °C ความชื้นในกระดาศเหลือ 0.5% vacuum pump ต้องมี ultimate pressure ต่ำกว่า 0.6 mm Hg (ดูจาก Piper chart)

การ Dry Out ที่ Site (หรือ Field Practices)

Heat และ Vacuum ใน field ขณะที่เปิดหม้อแปลงเพื่อติดตั้ง bushings หรือต่อสาย leads จำเป็นต้องใช้ dry-air ต่อเข้าไปภายใน tank และระบายออก purge ตลอดเวลาที่เข้าไปทำงานภายในทุกครั้ง เพื่อ safety ของผู้ปฏิบัติงาน และป้องกันความชื้นที่จะเข้าไปภายใน

สภาพหม้อแปลงใหม่ ก่อนเปิดมีความชื้นในฉนวนจากโรงงานต่ำกว่า 0.5% สามารถใช้ข้อแนะนำตาม installation manual ของผู้ผลิตได้ แต่หม้อแปลงเก่าใช้งานมานานจะมีความชื้นสูง ซึ่งอาจสูงถึง 5% คงใช้วิธีการเดียวกันทั้งหมดไม่ได้ คงต้องขึ้นกับสภาพแต่ละตัว ความร้อนที่ให้กับ core และ coil รวมถึง tank จะใช้วิธี hot oil circulation หรือ hot oil spray ซึ่งจะเหมือนกับ vapor phase แต่ต่างกันว่า hot oil spray จะมี oil film กันไว้ ทำให้ต้องใช้เวลาานานกว่า ควรตรวจสอบสภาพก่อนและหลัง dry out ด้วยการวัดค่า dew point โดยการอัด ไนโตรเจนที่มีค่า dew point ประมาณ -35 °C ไว้ที่ความดัน 0.2 Kg/sq-cm เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง อุณหภูมิขณะที่วัดไม่ควรเกิน 30 °C หรือวัดในช่วงเช้าของวัน การวัดค่าหลัง dry out แล้ว อาจต้องใช้เวลาถึง 24 ชั่วโมง เพราะต้องให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของทุกส่วนเท่ากัน ค่าความชื้นที่ยอมรับได้สำหรับหม้อแปลงที่ติดตั้ง

ที่ site และผ่านการใช้งานมานานแล้วควรมีค่า dew point อย่างน้อย -25°C ที่ อุณหภูมิหม้อแปลง หรือ ambient มีค่า 30°C หรือมีน้ำในฉนวนประมาณ 1%

Drying Time เวลาที่ใช้ในการ dry out ขึ้นอยู่กับการรักษาอุณหภูมิของฉนวนให้เท่ากับ อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ dry out ให้นานตลอดกระบวนการ และให้มี pressure different ระหว่างสภาพ แวดล้อมภายนอกฉนวนกับภายในเนื้อฉนวนให้มากที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้ vacuum ต่ำมากๆ อาจไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และไม่ให้ความแตกต่างของ differential pressure เท่าไรนัก เช่น ในขณะที่ vapor pressure ในกระดาษที่ 80°C มีความชื้น 0.5% จะมี partial pressure เท่ากับ 5 torr การใช้ vacuum pump ที่มีความสามารถ 0.02 torr และ 0.1 torr จะให้ differential pressure ไม่แตกต่างกันเลย คือ $5-0.02 = 4.98$ torr และ $5-0.1 = 4.9$ torr

อย่างไรก็ตามความชื้นภายในเนื้อฉนวนจะออกมาสู่ภายนอกได้ จะมี diffusion time นาน จึงควรเลือกใช้ vacuum pump ที่สามารถลดแรงดันได้ถึง 0.05 torr

การใช้ hot oil circulation โดยผ่าน oil purifier จะเพิ่มอุณหภูมิให้ insulation ได้ แต่ไม่สามารถทำให้น้ำออกจาก insulation ได้มากนักในเวลาที่มีจำกัด ลองพิจารณา กรณี overhaul หม้อแปลง ขณะที่พบว่าฉนวนภายในมีความชื้นสูง และใช้วิธี hot oil circulation ด้วยเครื่องที่มี capacity 12,000 ลิตร/ชม ที่อุณหภูมิ 80°C ถ้าใน main tank มีน้ำมัน 12,000 ลิตร มีฉนวนแข็ง 2,000 กิโลกรัมที่ดูดความชื้นได้ 3% หรือมีน้ำในฉนวน 60 ลิตร และมีน้ำในน้ำมัน 100 ppm ที่ 80°C หรือ 1.2 ลิตร สมมติว่าเมื่อน้ำมัน 12,000 ลิตรผ่านเครื่องอย่างต่อเนื่อง สามารถนำน้ำออกได้ 100 ppm ฉะนั้นในเวลา 1 ชม. จะสามารถกำจัดน้ำออกได้ 1.2 ลิตร หรือ ใช้เวลาประมาณ 1.5 วัน เพื่อทำให้น้ำเหลือ 1.0% ซึ่งในความเป็นจริงอาจต้องใช้เวลามากกว่า 10 เท่า หรือ ประมาณ มากกว่า 20 วัน เพราะต้องใช้เวลาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ทุกชั้นส่วน ซึ่งช่วงแรกความร้อนจะทำให้ core และ structure ที่เป็นโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อน และน้ำไม่สามารถออกมาละลายในน้ำมันได้ อย่างรวดเร็ว ทำให้แต่ละชั้นที่ที่น้ำมันผ่านเครื่องกรองไม่ได้ น้ำนี้ออกมา 100 ppm

ดังนั้นการ dry out จึงต้องลดความดัน และ ควบคุมอุณหภูมิให้สูงตลอดช่วงที่ใช้ vacuum pump ทำให้เกิด maximum different partial pressure เพื่อเร่งให้น้ำออกจากฉนวนเร็วขึ้น

การ dry out ที่ site ในกรณีที่หม้อแปลงมีความชื้นสูง หรือใช้งานมานานเกิด ageing อาจจำเป็นต้องถอด accessories เช่น bushing, radiator, conservator ออกก่อน หลังเปลี่ยนปะเก็น ทุกส่วนแล้วให้คลุมด้วยผ้าใบ เพื่อรักษาความร้อนให้อยู่ภายในขณะทำ hot oil circulation และ ตามด้วย vacuum ควรวัดอุณหภูมิของฉนวน เช่นอาจติดไว้ที่ leads แทนการอ่านจาก oil/winding temperature dial gauge ให้ทำการวัดค่า $\tan \delta$ หรือ mega-ohm จาก winding ชุดที่อยู่ติด core เช่น LV winding ในกรณีเช่นนี้จำเป็นต้องติด LV bushing ไว้ ขณะ vacuum ควรรักษาอุณหภูมิที่ฉนวนไม่ให้ต่ำกว่า 65°C เมื่อ dry out เสร็จจึงติดตั้ง accessories ที่สะอาดทั้งหมดก่อนเติมน้ำมันในสภาพ vacuum ต่อไป

เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการ dry out

1. dew point meter ใช้วัดค่าความชื้นใน gas phase ที่อยู่ในหม้อแปลงก่อน dry out เมื่อให้ทราบค่าปริมาณน้ำที่อยู่ในฉนวนแห้งก่อนเริ่ม process และวัดหลัง dry out เพื่อให้ทราบว่า ฉนวนมีสภาพแห้งอยู่ในระดับที่วางแผนไว้ โดยเทียบกับ Piper chart ข้อเสียของวิธีนี้คือต้องการสภาพหม้อแปลงที่อยู่ในสภาวะที่มี gas phase อยู่ภายใน (หรือยังไม่เติมน้ำมัน) ที่มีความดันประมาณ 0.2 bar และอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ ทั้งก่อนและหลังกระบวนการ เป็นเวลานานเพื่อสภาพสมดุล ความหมายคือต้องเสียเวลาดังหม้อแปลงทิ้งไว้ที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงมากนักประมาณ 12-24 ชั่วโมง
2. เครื่องมือวัด $\tan \delta$ ใช้วัดความชื้นในฉนวนแห้งทั้งก่อน ระหว่าง และหลัง dry out ถ้านำค่าต่างๆ มา plot กับเวลาจะทำให้ทราบแนวโน้มของการ dry out เนื่องจาก dielectric strength ของฉนวนแห้ง และอากาศภายในหม้อแปลง จะต่ำลงในสภาพ under vacuum ทำให้ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีแรงดันต่ำ เช่น 30 volt
3. megger ohm meter ใช้วัดเช่นเดียวกับเครื่องมือวัด $\tan \delta$ และไม่ควรมีแรงดันเกิน 100 volt
4. cold trapper ใช้เพื่อวัดปริมาณน้ำทั้งหมดที่ถูกดูดออกจากหม้อแปลงขณะ vacuum
5. vacuum gauge ใช้ติดที่ตัวหม้อแปลงในตำแหน่งที่ห่างจากจุดที่ต่อเข้ากับ vacuum pump เพื่อให้อ่านสภาพความดันภายในหม้อแปลงที่ใกล้เคียง
6. thermometer ควรเป็นชนิดที่สามารถติดไว้ภายใน ทนสภาพ vacuum ได้ เพื่ออ่านค่าได้จากภายนอกตู้

สรุปการ dry out ฉนวนของหม้อแปลง คือการใช้หลักการเปลี่ยนแปลงสมมูลของ vapor pressure และแนวปฏิบัติส่วนใหญ่ที่ใช้ที่ site จะใช้วิธีการ heat ด้วยวิธี hot oil circulation และ vacuum การเรียนรู้เรื่องความสามารถของเครื่องมือ วิธีการรักษาอุณหภูมิ และ เวลาที่ใช้ ตลอดจนค่าสุดท้ายของความชื้นที่อยู่ในฉนวนก่อนที่จะตัดสินใจว่ากระบวนการ dry out เสร็จสิ้นแล้ว จำเป็นต้องศึกษาทำความเข้าใจให้ดี จะทำให้มีประสิทธิภาพทั้งการใช้เวลาและพลังงาน

