

ปัญหาและการประเมินค่าความชื้นในฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า (Moisture in Power Transformers)

1. น้ำ/ความชื้นถือเป็นศัตรูตัวร้ายของหม้อแปลงไฟฟ้า...

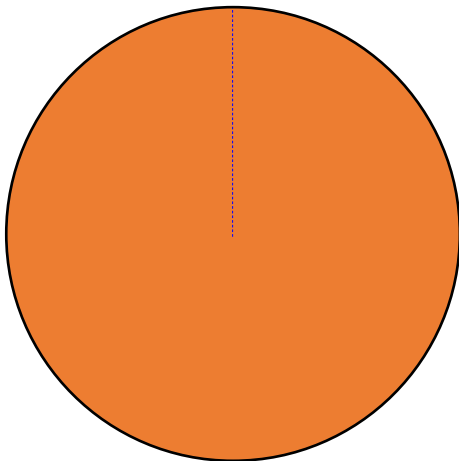
- หม้อแปลงที่มีความชื้นต่ำเปรียบเสมือนคนที่มีสุขภาพดี
 - สามารถใช้งานหม้อแปลงที่มีโหลดสูงได้โดยไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหา
- หม้อแปลงที่มีความชื้นมากเปรียบเสมือนคนน้ำหนักเกินที่มีสุขภาพไม่ดี
 - การใช้งานหม้อแปลงจำเป็นต้องจำกัดโหลดเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Bubble ขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่ปัญหาใหญ่ตามมา
 - ความชื้นในระบบฉนวนเป็นปัจจัยที่เพิ่มการเสื่อมสภาพให้เร็วขึ้น

2. น้ำส่วนใหญ่อยู่ที่ไหน?

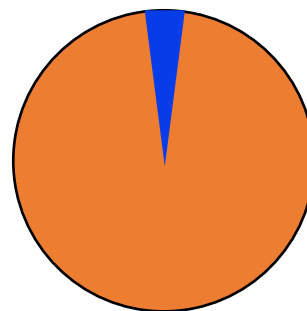
ระบบฉนวนของหม้อแปลง ประกอบไปด้วยฉนวนแข็ง(Cellulose) และฉนวนเหลว (Oil)

ยกตัวอย่าง หม้อแปลงขนาด 300 MVA ที่อุณหภูมิน้ำมัน 50 °C แสดงดังรูปที่ 1

- ปริมาณน้ำมันของหม้อแปลง 60 ตัน ที่มีค่า water content 20 ppm (Parts per million) คิดเป็นปริมาณน้ำได้เท่ากับ 1.2 ลิตร
- ปริมาณ Cellulose ของหม้อแปลง 10 ตัน ที่มีค่า water content 3% คิดเป็นปริมาณน้ำ 300 ลิตร
- สามารถกล่าวได้ว่าน้ำส่วนใหญ่อยู่ในฉนวนแข็ง (Cellulose)



20 ppm (parts per million) in 60 tons of oil



3% water in 10 tons of cellulose

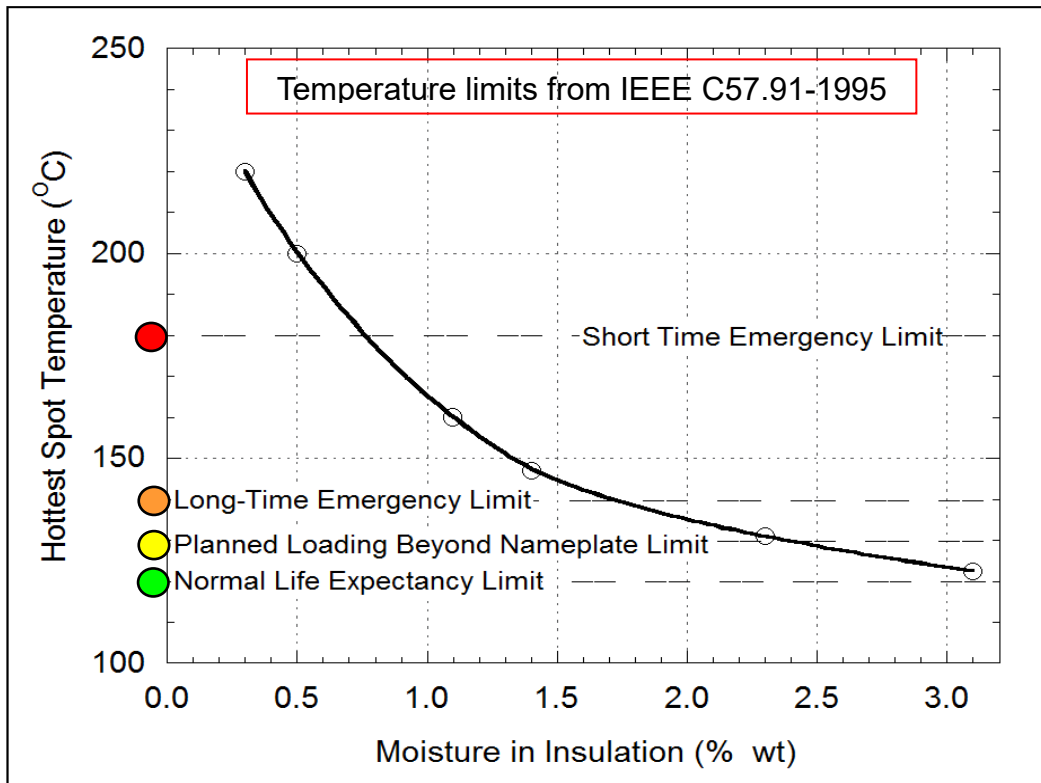
รูปที่ 1 แสดงปริมาณน้ำในฉนวนหม้อแปลง

3. น้ำ/ความชื้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของหม้อแปลงอย่างไร?

- ความสามารถในการจ่ายโหลด (Loading capability)

หม้อแปลงที่มีความชื้นจะต้องถูกจำกัดในการจ่ายโหลดไม่ให้สูง เนื่องจากอุณหภูมิที่ทำให้เริ่มเกิดฟองอากาศ (Bubble) จะลดลง

ความชื้นเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิสูงสุดในการจ่ายโหลด/อุณหภูมิ Hottest spot ที่ทำให้เริ่มเกิดฟองอากาศ แสดงดังรูปที่ 2



Reference: G. K. Frimpong et al, "Estimation of Moisture in Cellulose and Oil Quality of Transformer Insulation using Dielectric Response Measurements", Doble Client Conference, Paper 8M, 2001.

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความชื้น

- ความคงทนของฉนวน (Dielectric strength)

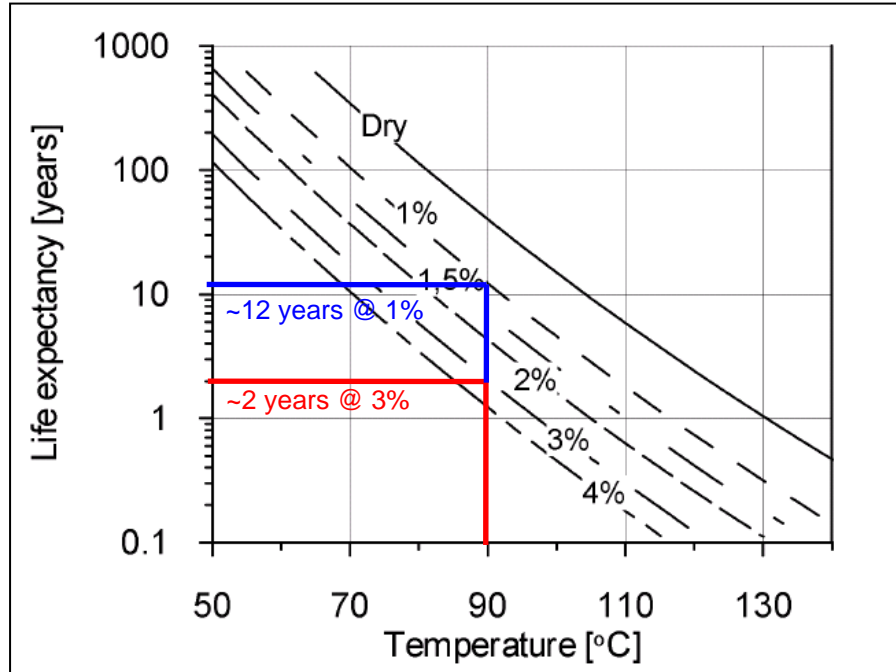
หม้อแปลงที่มีความชื้นจะทำให้ความเป็นฉนวนของน้ำมันลดลงและทำให้แรงดันที่เริ่มเกิด Partial discharge ลดลงด้วย (Inception voltage)

- อายุการใช้งานหม้อแปลง (Ageing)

อุณหภูมิการใช้งานที่สูงและความชื้นสูงจะนำไปสู่การทำให้อายุการใช้งานหม้อแปลงสั้นลง เนื่องมาจากความแข็งแรงทางกลของฉนวนแข็ง Cellulose ลดลง

ในกระบวนการผลิตหม้อแปลงใหม่ ฉนวน Cellulose จะถูก Drying out ทำให้แห้งก่อนที่จะทำการ Oil impregnated โดยทั่วไปค่าความชื้นของฉนวนแข็งของหม้อแปลงใหม่จะถูกกำหนดไว้ที่ค่าต่ำกว่า 0.5% (Moisture content by weight)

เมื่อหม้อแปลงมีอายุมากขึ้นความชื้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น กรณีหม้อแปลงประเภท open-breathing type ค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2% ต่อปี และหม้อแปลงประเภท sealed conservator type มีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นประมาณ 0.05% ต่อปี สำหรับหม้อแปลงเก่าหรือหม้อแปลงที่เสื่อมสภาพอาจมีค่าความชื้นมากกว่า 4% สามารถกล่าวได้ว่าอายุของฉนวนเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับปริมาณความชื้น แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุกับค่าความชื้นที่อุณหภูมิการใช้งานต่างๆ

4. นำมาจากที่ไหนบ้าง?

แหล่งที่มาของน้ำและความชื้นที่เข้ามาในหม้อแปลงมาจากสาเหตุหลัก 5 ข้อ ดังรูปที่ 4

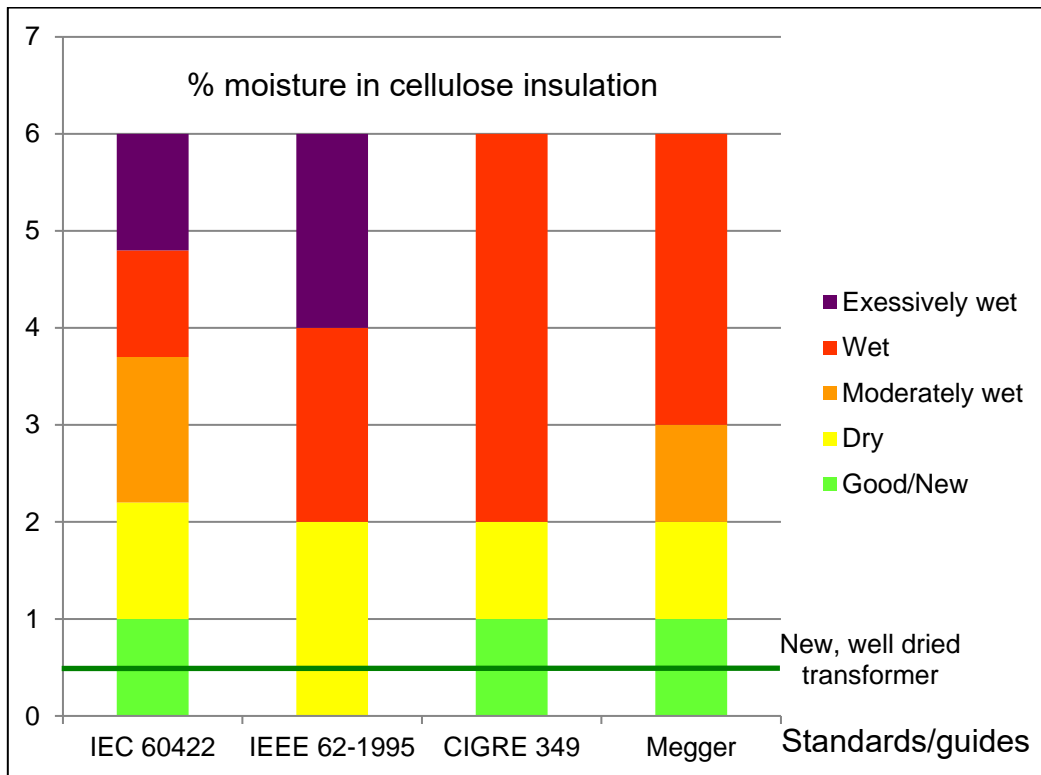


1. ประเก็นที่เสื่อมสภาพและรั่ว
2. สัมผัสกับความชื้นในระหว่างการติดตั้ง
3. สัมผัสกับความชื้นในระหว่างการบำรุงรักษา
4. การเสื่อมอายุของ Cellulose ปกติจะผลิตน้ำออกมา
5. การ Drying ที่ไม่เพียงพอในกระบวนการผลิต

รูปที่ 4 แสดงภาพหม้อแปลงที่ติดตั้งใช้งานจริงที่ Site

5. ค่าความชื้นตามมาตรฐานและคำแนะนำต่างๆ

มาตรฐานและคำแนะนำจากหลากหลายแหล่งได้มีการแปลผลค่าความชื้นของฉนวน Cellulose แตกต่างกันไป ดังแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การแปลผลค่าความชื้นของฉนวน Cellulose ตามมาตรฐานต่างๆ

6. การวัดค่าความชื้นของฉนวน Cellulose (Measuring moisture in cellulose insulation)

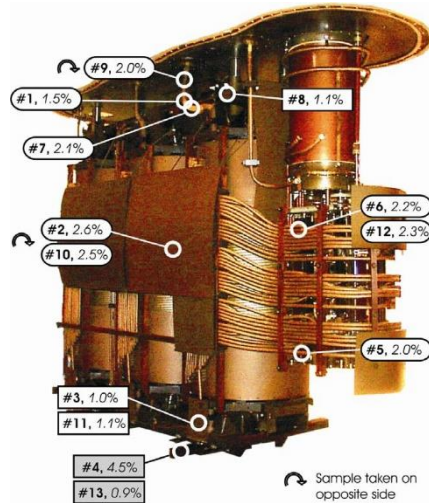
วิธีการในการวัดค่าความชื้นของฉนวน Cellulose แบ่งเป็น 2 วิธีหลักคือ วิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม โดยสรุปวิธีการได้ ดังแสดงตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีการในการวัดค่าความชื้นของฉนวน Cellulose

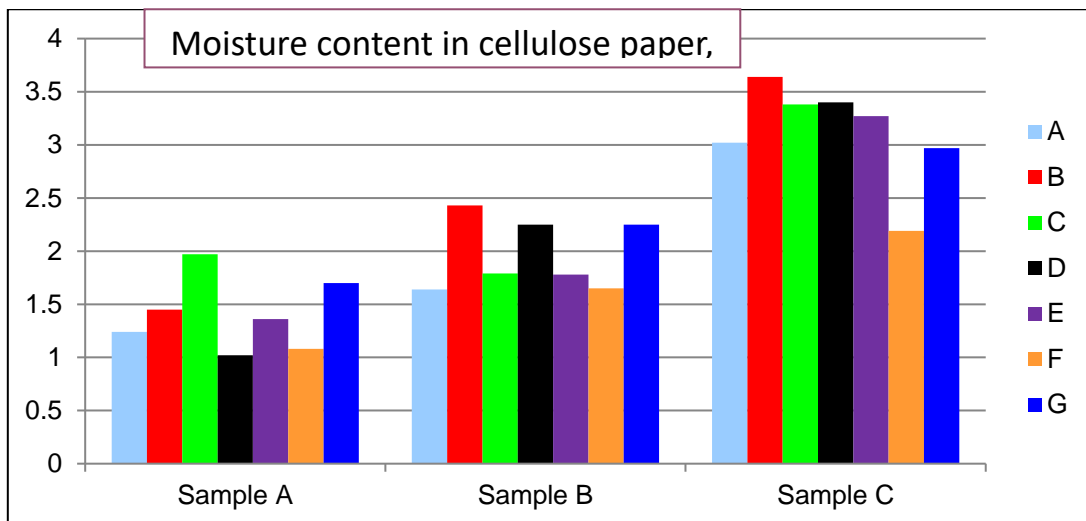
วิธีการทางตรง	วิธีการทางอ้อม	
นำตัวอย่างกระดาษจากหม้อแปลงและวัดความชื้นโดยใช้การไตเตรทแบบ Karl Fischer	Moisture in oil	
	- Absolute values	
	- Relative saturation	
	Power frequency tan delta/power factor measurements	
	Dielectric response measurements	
	DC method	AC method
	Polarization-Depolarization Current measurements (PDC)	Dielectric Frequency Response measurements (DFR/FDS)

6.1 การประเมินค่าความชื้นโดยใช้การไตเตรทแบบ Karl Fischer

- สามารถทำได้เฉพาะในระหว่างซ่อมเท่านั้น
- ค่าความชื้นของฉนวน Cellulose ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของตัวอย่างกระดาษ ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 6
- การหาค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์จำนวนมากเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้ได้ค่าที่แท้จริง
- ค่าความชื้นที่วัดได้อาจมีค่าแตกต่างกันไปตามห้อง Lab ที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ค่าความชื้นที่ตำแหน่งของตัวอย่างกระดาษที่แตกต่างกัน



Reference: M. Koch, "Creating a Reliable Data Base for Moisture Evaluation of Power Transformers", Pax and KTH Workshop on Variable Frequency Diagnostics, Stockholm, 2007

รูปที่ 7 แสดงค่าความชื้นที่วัดได้จากตัวอย่าง A,B ที่ห้อง Lab ต่างกัน

6.2 การประเมินค่าความชื้นจากค่า Absolute value ของฉนวนน้ำมัน

- สุ่มน้ำมันตัวอย่างในขณะที่หม้อแปลงใช้งานในระบบ
- เป็นการวัดปริมาณน้ำด้วยวิธีการไตเตรทแบบ Karl Fischer

- การได้มาซึ่งค่าความชื้นของฉนวน Cellulose ภายใต้เงื่อนไขแบบสมดุลหรือ equilibrium เท่านั้น
- เป็นวิธีการที่ดำเนินการได้ง่าย แต่มีข้อผิดพลาดจากผลกระทบต่างๆที่อาจเกิดขึ้นได้ดังนี้
 - การสุ่มตัวอย่างน้ำมันและการขนส่งตัวอย่าง
 - ผลที่ได้จากความแตกต่างของห้อง Lab ต่างๆ
 - ผลที่วัดได้ภายใต้สภาวะสมดุลเท่านั้น (ไม่ค่อยเกิดขึ้นในสภาวะการทำงานปกติ)
- วิธีการนี้มีแนวโน้มที่จะประเมินค่าความชื้นได้สูงกว่าความเป็นจริง

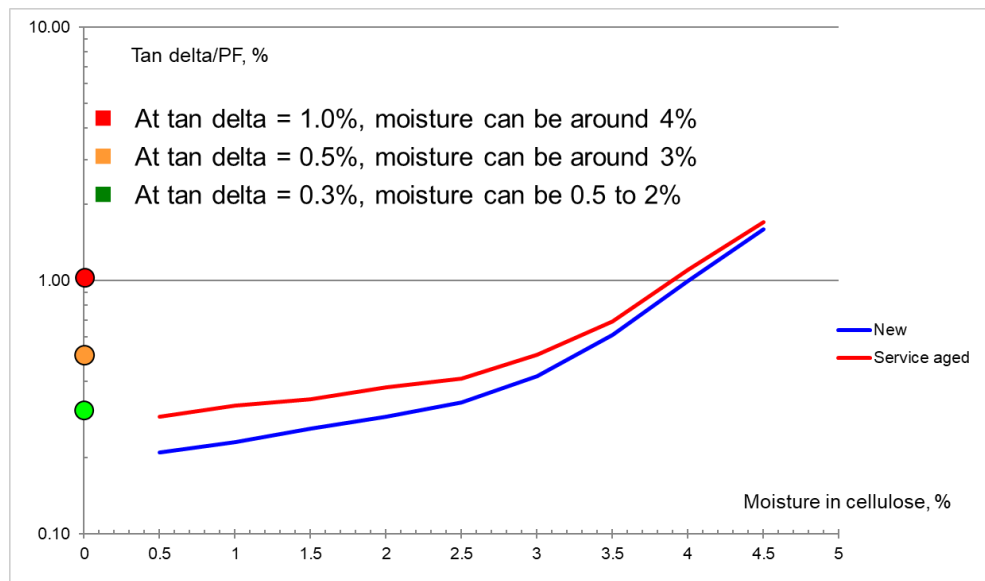
6.3 การประเมินค่าความชื้นจากค่า Relative saturation (RS)

- เป็นการวัดค่าความอิ่มตัวสัมพัทธ์ของน้ำในน้ำมัน (ppm/solubility: %) แทนการวัดค่าความชื้นสัมบูรณ์ตามน้ำหนัก (Absolute moisture by weight: ppm)
- มีความแม่นยำกว่าวิธีการสุ่มตัวอย่างน้ำมัน เนื่องจากตัดปัญหาเรื่องการสุ่มตัวอย่างและการขนส่ง
- ความสามารถในการดูดซับความชื้นไม่ค่อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ
- แต่ยังคงต้องใช้ equilibrium diagram

6.4 การประเมินค่าความชื้นจากค่า Tan delta/ Power factor

- ทำการวัดค่า Tan delta/ Power factor ที่อุณหภูมิทดสอบจริง
- สามารถ Convert ค่าที่วัดได้ไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C เพื่อทำการเปรียบเทียบกับ Guideline
- ตัวอย่าง Guideline
 - IEEE C57.152-2013 ระบุว่าค่า Tan delta/ Power factor ต้องน้อยกว่า 0.5% สำหรับหม้อแปลงใหม่
 - IEEE C57.152-2013 ระบุว่าค่า Tan delta/ Power factor ต้องน้อยกว่า 1% สำหรับหม้อแปลงที่ใช้งาน
 - Doble แนะนำว่า ค่า Tan delta/ Power factor ควรน้อยกว่า 0.3% สำหรับหม้อแปลงที่ไม่มี ความชื้น
- เป็นวิธีการที่ดำเนินการได้ง่ายและพบทั่วไป แต่มีข้อจำกัด
- ตารางที่ใช้ในการ Convert ค่า Tan delta/ Power factor จากอุณหภูมิทดสอบไปที่อุณหภูมิอ้างอิงไม่แม่นยำสำหรับหม้อแปลงแต่ละตัว
- ความชื้นในฉนวน Cellulose มีผลกระทบต่อกับค่า Tan delta/ Power factor จากการวัดที่ power frequency และที่อุณหภูมิทั่วไป

- หากค่า Tan delta/ Power factor มีค่าสูง ไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นปัญหาจากค่าความชื้นในฉนวน Cellulose หรือปัญหาจากฉนวนน้ำมัน



รูปที่ 8 แสดงค่า Tan delta (% ,20 °C) กับค่า Moisture(%) สำหรับหม้อแปลงใหม่และหม้อแปลงใช้งาน

6.5 การประเมินค่าความชื้นจาก Dielectric response

เปรียบเทียบวิธีการ Dielectric response จาก DC method และ AC method ดังแสดงตามตารางที่ 2

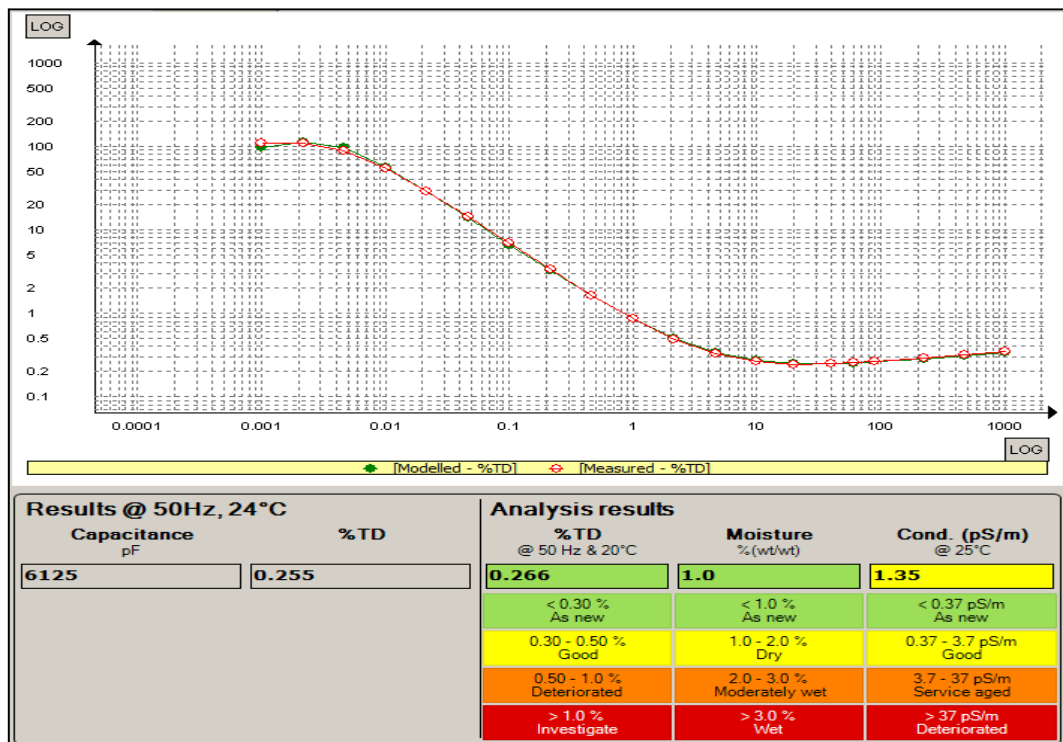
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบวิธีการ Dielectric response

วิธีการ	DC method Polarization-Depolarization Current measurements (PDC)	AC method Dielectric Frequency Response measurements (DFR)
จุดเด่น	ใช้เวลาในการวัดน้อยเมื่อวัดที่ความถี่ต่ำๆ	<ul style="list-style-type: none"> - วัตต์สัญญาณรบกวน AC น้อยกว่า(ในหน่วย milliamps) - วัตต์สัญญาณรบกวน DC น้อยกว่า(ในหน่วย microamps) - ช่วงความถี่ที่วัดกว้าง - ไม่ต้องมีการแปลงข้อมูล - ไม่ต้องทำการ Discharge ประจุก่อนการทดสอบ

วิธีการ	DC method Polarization-Depolarization Current measurements (PDC)	AC method Dielectric Frequency Response measurements (DFR)
จุดด้อย	- ไวต่อสัญญาณรบกวน AC (ในหน่วย microamps) - ไวต่อสัญญาณรบกวน DC (ในหน่วย nanoamps) - ช่วงความถี่จำกัด (PDC เท่านั้น) - ต้องทำการ Discharge ประจุก่อนการ ดำเนินการวัด PDC เสมอ	ใช้เวลาในการทดสอบนานเมื่อวัดที่ ความถี่ต่ำๆ

7 Dielectric Frequency Response measurements (DFR)

- เป็นการวัดค่า Tan delta ตั้งแต่ความถี่ 1 kHz ถึง 1 MHz
- สามารถประเมินค่าต่างๆได้ดังนี้
 - Moisture in paper
 - Conductivity/dissipation factor ของน้ำมัน
 - ค่า Tan delta/ Power factor ที่ Correct ไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C อย่าง
ถูกต้องสำหรับหม้อแปลงนั้นๆ



รูปที่ 9 ตัวอย่างการแสดงผลที่ได้จากการวัด DFR

8 สรุป

- ความชื้นคือศัตรูตัวร้ายของระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า
 - จำกัดความสามารถในการจ่ายโหลด
 - ทำให้อายุสั้นกว่ากำหนด
 - ลดความเป็นฉนวน
- น้ำ/ความชื้นส่วนใหญ่อาศัยอยู่ในฉนวนแข็งหรือ Cellulose มากกว่าในน้ำมัน
- ในปัจจุบันมีวิธีการที่ประเมินค่าความชื้นในฉนวน Cellulose ด้วยวิธีการ Dielectric frequency response (DFR) ซึ่งสามารถประเมินค่า
 - Moisture in paper
 - Conductivity/dissipation factor ของน้ำมัน
 - ค่า Tan delta/ Power factor ที่ Correct ไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C อย่างถูกต้องสำหรับหม้อแปลงนั้นๆ

แหล่งที่มา : Moisture in Power Transformers -How to Estimate and What to do?