

[变压器]

变压器套管绝缘油在不同频率下的介电损耗研究

文/曾辉

江西赣能股份有限公司居龙潭水电厂

传统变压器套管绝缘油的介电损耗在不同频率下出现灵敏度误差大、发热的问题，为此对变压器套管绝缘油在不同频率下的介电损耗展开研究。首先阐述频域介电谱通过测量不同频率下绝缘油介电响应以获取其介电特性的原理，以及XY模型为理解介电现象的理论框架。接着介绍频域介电谱实验，获取绝缘油介电参数随频率变化数据，对含水绝缘油介电性质、工频介损与低频介损、电导率性能进行数据分析，分析表明，水分显著改变其介电特性，影响绝缘性能，低频介损对绝缘油劣化更敏感，电导率增加会增大介电损耗。该研究为深入认识变压器套管绝缘油在不同频率下的介电损耗特性，评估其绝缘状态提供理论与实验依据，对保障变压器安全稳定运行具有重要意义。

变压器是电力系统的核心设备，变压器套管绝缘油的性能直接关系到变压器的绝缘可靠性，其中介电损耗是评估绝缘油性能的关键指标之一。不同频率下绝缘油的介电损耗特性，能有效反映其内部物理化学变化，对深入了解绝缘油绝缘状态意义重大。

变压器套管绝缘油在不同频率下的介电损耗研究存在环境因素对实验结果干扰大，难以精准控制和分离其影响以及理论模型对复杂工况下的介电损耗现象解释和预测能力有限的问题。本文选择频域介电谱和XY模型，开展绝缘油介电损耗研究，通过测量不同频率下绝缘油的介电响应，能够精准获取绝缘油介电参数随频率的变化规律，为研究介电损耗提供重要手段。XY模型为绝缘油介电现象提供微观视角理论支撑，有助于理解介电损耗机理。

对工频介损与低频介损分布情况进行分析，可明确不同频率下介损检测对绝缘油劣化的敏感度差异，进一步完善对绝缘油介电损耗特性的认知，提

高评估变压器绝缘状态的准确性，对保障电力系统可靠运行具有重要的现实意义。

频域介电谱和XY模型理论基础

1. 频域介电谱理论基础

研究变压器套管绝缘油在不同频率下的介电损耗时，频域介电谱是一种极为重要的分析手段。因为绝缘油在交变电场作用下存在特殊的介电响应特性，所以通过测量不同频率下的介电参数，揭示绝缘油内部的物理化学过程与微观结构信息。

不同频率的电场会激发绝缘油内部不同的极化机制，这些机制相互作用，共同决定了绝缘油的介电性能。复介电常数的实部和虚部分别反映绝缘油储存和损耗电能的能力，能全面表征绝缘油在交变电场中的介电特性。介电损耗与损耗角正切直接体现绝缘油在电场中的能量损耗程度。因此本文选择复介电常数以及介电损耗与损耗角正切值作为测量的关键参数。

在交变电场的作用下，绝缘油的电极化强度与

电场强度存在响应关系，关系表达式为

$$\vec{P} = x\epsilon\vec{E} \quad (1)$$

式中， ϵ 为真空介电常数； E 为电场强度； P 为电极化强度； x 为电极化率。

电极化率反映了绝缘油在电场作用下被极化的难易程度，当施加电场时，绝缘油中的极性分子会趋向于沿电场方向排列，或非极性分子的电荷分布发生畸变，从而产生电极化现象。电场强度的变化会直接导致电极化强度相应改变，并且该响应关系随电场频率、绝缘油成分及温度等因素而变化。

德拜弛豫模型是描述电介质在交变电场中介电响应的经典模型。对于单弛豫过程的绝缘油，其复介电常数随频率的变化关系为

$$\delta^*(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (2)$$

式中， ϵ 为复介电常数； ϵ_s 为静态相对介电常数，是频率趋于零时的相对介电常数； ϵ_{∞} 为高频极限相对介电常数，反映频率趋于无穷大时的相对介电常数； j 为弛豫时间； ω 为电介质极化建立或消失的时间尺度； τ 为角频率。

将德拜公式展开，绝缘油的介电特性通常用复介电常数表示，表达式为

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3)$$

式中， ϵ 为复介电常数； ϵ' 表示实部； ϵ'' 表示虚部。

实部为相对介电常数，反映了绝缘油在电场中储存电能的能力，虚部为绝缘油在电场中损耗电能的能力，与介电损耗密切相关。通过频域介电谱测量，获取不同频率下的实部和虚部，可以深入分析绝缘油的介电损耗特性。结合德拜弛豫模型等理论，有助于理解绝缘油内部的极化机制、分子运动以及杂质和水分等因素对介电性能的影响，为评估变压器套管绝缘油的绝缘状态提供理论支持。

介电损耗是指绝缘油在交变电场作用下，由于极化过程中能量的不可逆转换而产生的能量损耗。介电损耗角是电流相量与电容电流相量之间的夹角，其正切值表达式为

$$\tan \lambda = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4)$$

式中， λ 为介电损耗角； $\tan \lambda$ 为正切值。

介电损耗与损耗角正切值反映绝缘油在单位时

间内每单位体积中损耗的能量与储存的能量之比，当绝缘油劣化或受到污染时，正切值会增大。

2. XY模型理论基础

在研究变压器套管绝缘油在不同频率下的介电损耗时，XY模型提供一个重要的理论框架，有助于从微观层面理解绝缘油的介电特性。XY模型是一种描述二维自旋系统的模型，其中每个自旋可以在平面内自由旋转。在绝缘油的研究中，可以将绝缘油中的分子或微观结构单元类比为自旋，在电场作用下的取向变化类似于自旋在磁场中的行为。同理，XY模型为研究绝缘油分子在电场中的取向和相互作用提供分析方法。从宏观上，XY模型的哈密顿量描述了系统的能量，其表达式为

$$H = J \sum_{(i,j)} \cos(\theta_i - \theta_j) - h \sum_i \cos(\theta_i - \vartheta) \quad (5)$$

式中， J 为相邻自旋之间相互作用强度的参数； (i,j) 表示对所有相邻自旋对求和； h 为外场的强度； ϑ 为外场的方向。

绝缘油的介电损耗源于分子在电场中不断改变取向时的能量损耗。在XY模型中，自旋的翻转和重新取向对应于绝缘油分子的取向变化。通过分析自旋系统在不同频率电场下的响应，可以理解绝缘油分子如何响应电场的快速变化，以及由此导致的能量损耗。

XY模型通过描述分子间相互作用和对外场的响应，为解释这种频率相关的介电损耗现象提供了理论基础。当电场频率较低时，绝缘油分子有足够时间调整取向以适应电场变化，此时介电损耗相对较小。而当电场频率较高时，分子来不及完全跟随电场变化，导致取向变化过程中的能量损耗增加，介电损耗增大。

配分函数是统计物理中联系微观状态与宏观热力学性质的关键量，内能的变化可以反映绝缘油在电场作用下分子取向变化所消耗的能量，进而与介电损耗建立联系，其配分函数为

$$U = \frac{\partial F}{\partial T} \quad (6)$$

式中， ∂ 为玻尔兹曼常数； T 为温度； F 为内能； S 为自有能。

综上所述，XY模型为研究变压器套管绝缘油在不同频率下的介电损耗提供一种基于微观相互作用的理论视角。

频域介电谱实验

通过频域介电谱实验模拟验证不同频率下绝缘油的介电损耗，并对含水绝缘油介电性质、工频与低频介损对比以及电导率影响进行分析。

实验样品选取25#、10#和45#的纯净变压器套管绝缘油，分别制备不同含水量的绝缘油样本。同时，准备环烷酸金属盐添加剂来精确控制电导率，对绝缘油的电导率进行实验控制。实验设备采用Concept 80型号的高准确度的频域介电谱测试仪，可测试0.1~70 Hz的交流电频率，精确测量绝缘油的复介电常数实部、虚部以及介电损耗角正切值。为保证实验研究结果的准确性，实验环境需保持实验环境温度、湿度恒定，避免环境因素对实验结果产生干扰。

变频器的低压绕组和高压绕组对于不同频率的适应性高，可降低铜损和铁损，因此本实验选择低压绕组参数为内径226 mm，外径256 mm，饼线圈共18个，每饼共10匝线圈，每饼的间距为3 mm，选择ZB-0.45型号的纸包扁平铜线。高压绕组参数为内径346 mm，外径376 mm，饼线圈共18个，每饼共10匝线圈，每饼的间距为3 mm，选择ZB-0.45型号的纸包扁平铜线。变压器模型结构如图1所示。

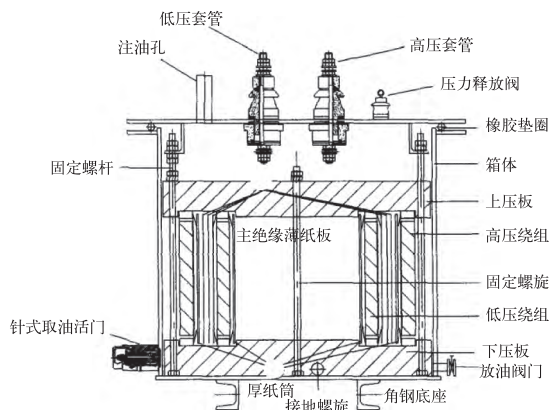
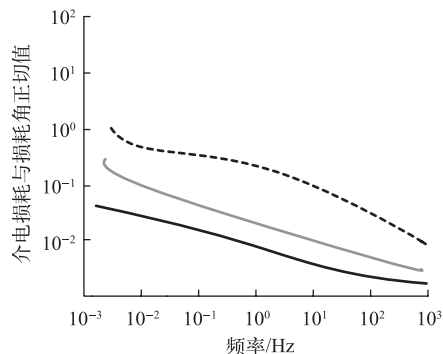


图1 变压器模型结构图

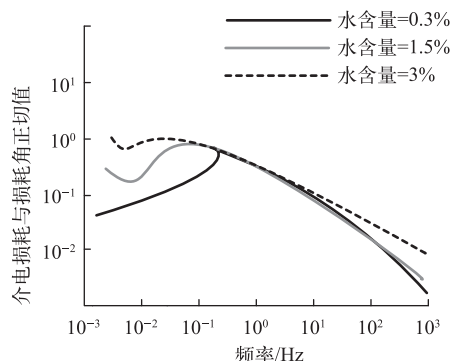
结果与分析

1. 含水绝缘油的介电性质分析

本实验选择水分质量分数为0.3%、1.5%和3%三个不同含量的绝缘油进行仿真模拟，分析不同水分含量情况下的绝缘油介电损耗变化数据，汇总曲线如图2所示。



(a) 绝缘油电导率较小



(b) 绝缘油电导率较大

图2 不同水分含量的介电损耗因数频域谱图

随着含水量增加，绝缘油复介电常数实部和虚部均增大。因为水分子具有较强的极性，易在电场中极化，形成有序排列，增加绝缘油整体的极化程度。随着含水量增加，更多水分子参与极化，使绝缘油极化程度大幅提升。极化过程中，水分子与周围分子相互作用、摩擦，消耗能量，导致复介电常数虚部增大。介电损耗角正切值增大意味着能量损耗加剧，当含水量过高时，绝缘油绝缘性能下降，增加电气设备故障风险。

2. 工频介损和低频介损对比

变压器套管绝缘油性能关乎电力系统稳定运行。介损作为关键指标，在不同频率下表现各异。工频与低频介损的对比分析，有助于深入了解绝缘油性能，可及时发现潜在故障。

根据XY模型，仿真模拟曲线如图3所示。

在50 Hz频率下，绝缘油的介损值相对稳定。这是因为在该频率下，绝缘油内部分子的极化过程稳定，分子的取向和位移极化基本能跟上电场的变化节奏，使得整体的介电损耗处于相对平稳的状态。然而，这种稳定性也导致工频介损对绝缘油早期劣化的敏感度较低。早期劣化通常表现为绝缘油中少

量杂质的混入或分子结构的轻微改变,这些细微变化在工频电场下,不足以引起介损值的显著波动,所以难以被工频介损检测察觉。

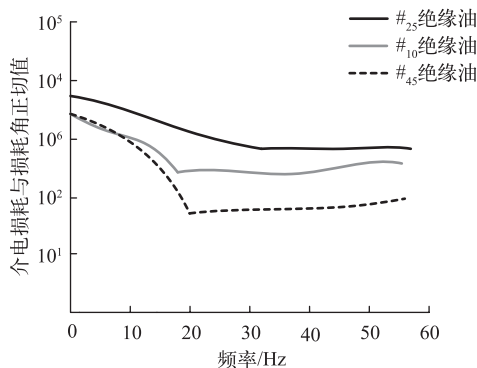


图3 工频和低频介电损耗数据对比

在1~10 Hz低频阶段,随着频率升高,电场变化速率减缓,绝缘油中界面极化过程,对介损的贡献逐渐增大。界面极化发生在绝缘油与其中杂质、水分或其他相态物质的界面处。在低频电场下,电荷有更充足的时间在这些界面处积聚和移动,从而产生额外的能量损耗,使得介损值变化更为明显。

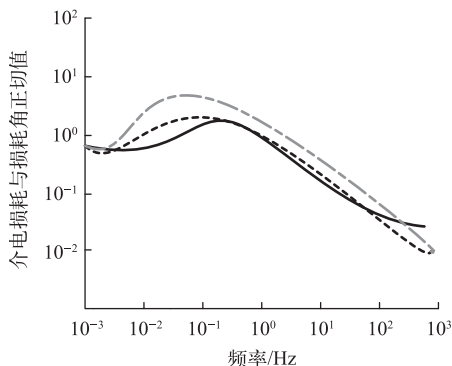
当绝缘油存在轻微劣化或含有少量杂质时,这些杂质或劣化产物会在绝缘油内部形成新的界面,为界面极化提供更多场所。低频电场下,这些新增界面的极化作用凸显,介损值随之发生显著变化。而工频电场由于变化速度快,电荷来不及在这些细微界面处充分积聚,介损值难以体现出这些早期劣化迹象。因此,相比工频介损,低频介损在检测绝缘油早期潜在故障方面具有更高灵敏度,能够更及时地发现绝缘油性能的细微变化,为变压器的维护和故障预防提供更有依据。

3. 绝缘油电导率影响分析

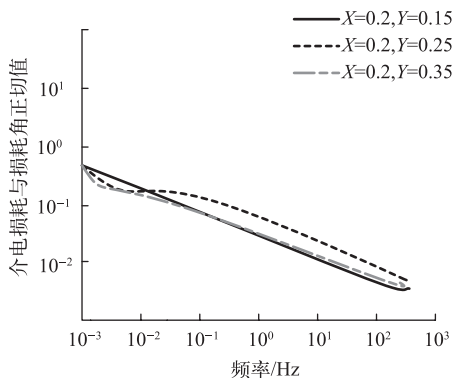
变压器工作过程中,需要更换滤油,所以分析绝缘油电导率对绝缘油在不同频率下的介电损耗是有必要的。根据XY模型仿真,设定 $X=0.3$, $Y=0.2$,仿真不同电导率情况下的绝缘油介电损耗变化数据,汇总曲线如图4所示。

针对25#、10#和45#不同的绝缘油,实验仿真数据的趋势为电导率 <1 pS/m,介电损耗逐渐增大,数据稳定在 $10^{-3} \sim 11$ Hz范围内,处于高频频率范围内时,绝缘油的介质损耗基本稳定,没有增加的趋势。当电阻率 >1 pS/m时,绝缘油的介电损耗

在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 范围大于高频区域。这是因为电导率增大,绝缘油中自由电荷增多。在交变电场作用下,自由电荷的定向移动加剧,产生更多的焦耳热损耗,导致介电损耗增大。同时,电导率变化还会影响绝缘油内部电场分布,进一步影响极化过程,从而对介电损耗产生影响。



(a) 绝缘油电导率较大



(b) 绝缘油电导率较小

图4 不同电导率绝缘油介电损耗变化图

结束语

本文围绕变压器套管绝缘油不同频率下的介电损耗,综合运用频域介电谱与XY模型,从理论与实验多维度展开分析。频域介电谱实验有效揭示绝缘油介电参数随频率的变化规律,可为早期故障诊断提供有力依据。根据绝缘油的电导率影响分析,电导率上升会导致介电损耗增大,明确介电损耗的影响机制。

本文不仅深化对变压器套管绝缘油介电损耗特性的理解,为评估绝缘状态提供重要参考。未来可进一步探索宽频域下的介电响应,结合更多先进检测技术,构建更精准的绝缘评估体系,为电力系统安全稳定运行筑牢基础。EA

(收稿日期:2024-10-17)