 DOI: https://doi.org/10.12345/dlynyqy.v3i12.35070

Comparison and improvement of rapid detection methods for moisture content in insulation oil of new energy power equipment

Pan Wang

Beijing Tanghao Electric Power Engineering Technology Research Co., Ltd., Beijing, 100052, China

Abstract

The stable operation of new energy power equipment is the core link to ensure the reliability of the energy supply system, and insulation oil, as the key medium for equipment insulation and heat dissipation, its moisture content directly determines the insulation performance and equipment service life. In this situation, moisture factors can exacerbate the aging of insulation oil, reduce breakdown voltage, and cause equipment failures or even safety accidents. This article first analyzes the core value of insulation oil moisture detection, and then systematically compares mainstream rapid detection methods such as Karl Fischer method, capacitance method, infrared spectroscopy method, high-frequency resonance method, etc. from the aspects of principles, applicable scenarios, and advantages and disadvantages. Finally, in response to the shortcomings of existing methods, improvement strategies are proposed from three dimensions: optimization of detection accuracy, improvement of anti-interference ability, and intelligent integration. This provides reference for the practical application and upgrading of insulation oil moisture detection technology for new energy power equipment.

Keywords

new energy power equipment; Insulation oil; Moisture content; Rapid detection; Method improvement

新能源电力设备绝缘油水分含量快速检测方法对比与改进

王攀

北京唐浩电力工程技术研究有限公司，中国 · 北京 100052

摘　要

新能源电力设备稳定运行作为保障能源供应体系可靠性的核心环节，而绝缘油作为设备绝缘与散热的关键介质，其水分含量直接决定绝缘性能与设备使用寿命这一状况下，水分因素会加剧绝缘油老化、降低击穿电压并引发设备故障甚至安全事故。本文先针对绝缘油水分检测的核心价值予以分析，接着系统对比诸如卡尔费休法、电容法、红外光谱法、高频谐振法等主流快速检测方法，从原理、适用场景以及优缺点方面进行比较，最后针对现有方法存在的不足，从检测精度优化、抗干扰能力提升、智能化集成这三个维度提出改进策略，从而为新能源电力设备绝缘油水分检测技术的实践应用与升级提供参考。

关键词

新能源电力设备；绝缘油；水分含量；快速检测；方法改进

1 引言

在新能源电力系统规模化发展进程中，风电、光伏等设备的户外运行环境复杂，温度波动、湿度变化及机械振动等因素均会影响绝缘油的理化性能。水分作为绝缘油的关键劣化指标，不仅会降低油膜击穿强度，还会加速油质氧化与设备内部金属部件腐蚀，诱发绝缘故障。传统检测方法存在检测周期长、需离线取样等问题，难以满足新能源设备实时状态监测的需求。

【作者简介】王攀（1986–），女，中国河北保定人，本科，工程师，从事电力新能源研究。

2 新能源电力设备绝缘油水分检测具有重要性

2.1 绝缘油在新能源电力设备中发挥作用

新能源电力设备像风电变流器、光伏逆变器、储能变压器之类，其运行环境常伴随高电压、大电流以及复杂工况，绝缘油承担双重核心功能，一方面是绝缘隔离，通过填充设备内部绝缘间隙，以阻止电荷击穿形成漏电通道，进而保障设备带电部件与接地部分的绝缘可靠性；另一方面是散热降温，将设备运行中产生的焦耳热、铁损热等及时传导到外部冷却系统，避免局部温度过高致使绝缘老化或者器件损坏。相较于传统电力设备，新能源设备启停频繁且负荷波动大，因而对绝缘油的性能稳定性提出更高要求 [1]。

2.2 水分含量对绝缘油性能产生影响

水分作为绝缘油最主要的有害杂质之一，其对绝缘油性能的破坏具备累积性和隐蔽性。从绝缘性能角度而言，水分会降低绝缘油的击穿电压，在水分含量超过临界值时，油中会形成连续的导电通道，最终导致绝缘击穿事故；从化学稳定性角度来说，水分会加速绝缘油的氧化老化反应，生成酸类、胶质等降解产物，这些产物进一步降低油的绝缘性能，与此同时腐蚀设备金属部件；从散热性能方面来看，水分的导热系数与绝缘油差异较大，会破坏油的均匀散热特性，致使局部热点形成，从而加速设备老化。因此，实时掌握绝缘油水分含量并及时干预是预防新能源电力设备故障的关键手段 [2]。

3 新能源电力设备绝缘油水分含量快速检测主流方法

3.1 卡尔费休法

卡尔费休法作为基于化学滴定反应的水分检测方法，其核心原理在于利用碘与二氧化硫在吡啶和甲醇的催化作用下，与水分发生定量反应，通过检测反应过程中碘的消耗量来对水分含量进行计算。依据不同检测方式，被划分为滴定法与库仑法这两类，其中滴定法借助人工或者自动滴定管来添加已知浓度的碘溶液，在反应达到终点之际对碘溶液的消耗量加以记录，而库仑法则通过电解产生碘，依据电解时消耗的电量去计算碘的生成量进而推导水分含量 [3]。

3.2 电容法

它是一种基于绝缘油与水分介电常数差异的物理检测方法，利用检测传感器与绝缘油样本构成电容结构，因其水分的介电常数（约 80）远高于绝缘油的介电常数（约 2.2-2.5），油中水分含量发生变化时电容的电容量便会随之出现线性变化，所以通过检测电容量的变化量就能反推水分含量。为提升检测灵敏度，电容法检测传感器一般采用平行板或者同轴圆柱结构，并对电极表面做绝缘处理，以此避免油中杂质对检测结果造成干扰 [4]。电容法在新能源电力设备检测方面，具有检测速度快这一突出优势，单次检测可在数秒内完成，适合现场实时检测和在线监测，并且设备结构简单、体积小、成本低，便于携带与批量部署，再者检测过程无需消耗化学试剂，属于无损检测方式，对环境和操作人员友好。但它也存在主要不足，即检测精度受环境因素影响较大，比如温度变化会致使绝缘油介电常数产生波动进而影响电容检测结果，所以需要额外配备温度补偿模块，同时当绝缘油中存在杂质、胶质等污染物时，会附着在传感器电极表面，导致电容值飘移影响检测稳定性，此外电容法的检测范围相对较窄，在水分含量极低或极高时检测误差会显著增大 [5]。

3.3 红外光谱法

它是基于分子振动吸收特性的光谱检测方法，原理为水分子中的 O-H 键在特定红外波长（约 1.94μm、2.94μm）处会产生强吸收峰，然而绝缘油中的烃类分子在此波长范围内无明显吸收，通过检测红外光穿过绝缘油样本后的吸光度变化，依据朗伯 - 比尔定律便可计算水分含量。为提升检测精度，实际应用中通常采用双波长检测技术，目的在于消除油样厚度、浑浊度等因素对检测结果的干扰。红外光谱法具有检测速度快的优势，单次检测能在 1 分钟内完成，且属于非接触式检测无需对样本进行预处理，还能够同时检测绝缘油的水分含量、酸值、介损等多项指标实现多参数综合评估，再者检测过程无试剂消耗维护成本低。不过其局限性主要体现在检测精度受样本均匀性影响较大，若绝缘油中存在水分乳化或分层现象会导致吸光度检测偏差，设备受环境温度和湿度影响较大，需在恒温恒湿环境下运行限制了现场检测的适用性，并且红外光谱仪的核心部件如检测器、光源等成本较高，初期设备投入较大不利于大规模推广应用。

3.4 高频谐振法

谐振电路在无线电技术、广播电视技术中有着广泛的应用。各种无线电装置、设备、测量仪器等都不可缺少谐振电路。这种电路的显著特点就是它具有选频能力，它可以将有用的频率成分保留下来，而将无用的频率成分滤除，比如收音机、电视机。收音机的天线会同时接收多个电台发射的不同载波的广播节目，而我们收听时，必须在这众多广播节目中选出我们所要接收的那一套广播节目，这就是选频（选台）。改变谐振电路的谐振频率，使其谐振在所需要接收台的载频上，从而选择出所接收台的广播信号，而滤除掉除此之外的其他台及外来的无用信号，这就完成了选台。电视机的选台也是如此。高频谐振法这种基于电磁感应原理的检测方法，其原理是将绝缘油样本放置于高频谐振电路那具有检测功能的线圈之中，由于油中水分含量发生的变化会使得样本的介电常数与电导率跟着出现改变，而这种改变又会进一步致使谐振电路的谐振频率和品质因数产生变化，人们正是通过检测这两个参数所产生的变化量来建立与水分含量之间的定量关系，并且为了提升检测灵敏度而通常采用兆赫兹级的高频信号，以使水分子的极化响应能够更为显著。这种高频谐振法具备检测灵敏度高能够检测痕量水分而且响应速度快从而适合在线实时监测的优势，其检测过程不会受到绝缘油诸如颜色、浑浊度等外观特性的影响所以适应性强，同时其设备结构相对简单进而维护成本较低；但它也存在局限性，主要体现为检测结果会受到温度较大影响因此需要进行温度校准，而且当绝缘油里存在金属杂质或者磁性物质时，会干扰到检测线圈的磁场分布最终导致检测出现误差，此外谐振电路的稳定性对检测精度影响极大所以需要高精度的电子元件予以支持，这就增加了设备成本。

4 新能源电力设备绝缘油水分含量快速检测方法改进策略

4.1 基于多传感器融合的精度优化

单一的检测方法因自身原理所带来的限制，很难兼顾检测精度、速度以及稳定性这些方面，而基于多传感器融合

的检测技术能够有效解决这一难题。针对新能源电力设备绝缘油检测的特定需求，可把电容传感器与红外光纤传感器进行融合，电容传感器用来实现快速粗测并获取水分含量的大致范围，接着红外光纤传感器针对电容传感器所检测出的偏差区间展开精准复测，之后通过数据融合算法对两组检测数据进行加权处理以此提升整体检测精度。数据融合算法可以采用自适应加权融合策略，依据两种传感器的检测误差动态调整权重系数，即在绝缘油水分含量较低的情况下，红外光纤传感器检测精度更高故而提升其权重，而当水分含量较高的时候，电容传感器的稳定性更优所以增加其权重，同时引入温度传感器实时采集环境温度数据并建立温度补偿模型，对融合之后的检测结果开展温度校准工作，进一步降低环境因素所产生的影响。

4.2 抗干扰结构设计与算法优化

针对现场检测过程中所存在的杂质干扰、电磁干扰等一系列问题，需要从硬件结构与软件算法这两个层面进行优化。在硬件层面上，要对检测传感器进行抗干扰设计，电容传感器采用同轴屏蔽结构来减少外部电磁信号对电极所造成的干扰，并且在电极表面涂覆疏油疏水涂层用以防止杂质和胶质附着，而红外光谱传感器增加光学滤波模块，通过过滤环境光以及油样杂质所产生的杂散光，提升光谱信号的信噪比。

在软件算法层面需引入能处理检测信号的自适应滤波算法，就像采用卡尔曼滤波算法针对电容法以及高频谐振法所产生的检测信号，对其开展平滑处理工作，以此消除随机干扰；而针对红外光谱法出现的基线漂移这一棘手问题，应采用多项式拟合基线校正算法，对光谱信号开展预处理，从而达成提升吸光度检测准确性的目的。并且，建立杂质干扰数据库，借助机器学习算法去训练干扰识别模型，以实现对杂质干扰信号进行自动识别与剔除，进而进一步提升检测结果的可靠性。

4.3 智能化检测系统集成

结合新能源电力设备朝着智能化方向发展的这一趋势，构建一种集检测、数据传输以及分析预警于一体的智能化检测系统。此系统硬件是由具备多传感器融合结构的检测模块、实现对检测信号高精度采集与模数转换的数据采集模块、通过 5G 或者物联网技术将检测数据实时传输至云端平台的无线通信模块以及实现设备本地控制与数据预处理的嵌入式控制模块所共同组成。

系统软件采用“本地 + 云端”的架构，其中本地软件能够实现检测参数设置、实时数据显示以及本地数据存储等功能；云端平台则采用大数据分析技术，把多台设备的检测数据进行汇总分析，建立关于绝缘油水分含量变化趋势的模型，依靠趋势预测达成故障预警的效果；与此同时，平台集成设备管理功能，可远程监控检测设备的运行状态，从而实现检测数据的追溯以及统计分析。另外，开发移动端应用程序，以便运维人员实时查看检测结果与预警信息，进而提升运维效率。

5 结论

新能源电力设备绝缘油水分含量的快速精准检测属于保障设备安全稳定运行关键的技术支撑，不同检测方法各有其独特的优劣之处，例如卡尔费休法虽然精度高然而检测速度慢且成本高，适合于实验室进行精准检测；电容法速度快、成本低可精度受环境影响程度大，适合在现场进行快速筛查；红外光谱法能实现多参数检测但设备成本高昂，适合用于综合评估场景；高频谐振法灵敏度高不过抗干扰能力较弱，适合开展在线监测。针对现有方法存在的不足之处，从多传感器融合、抗干扰优化以及智能化集成这三个方向提出的改进策略，能够有效提升检测精度、稳定性以及适用性。未来，伴随着人工智能、物联网等技术更为深度的融合，绝缘油水分检测技术将会朝着“实时监测—趋势预测—智能预警”这样的全链条智能化方向发展，为新能源电力设备的精益化运维提供更为有力的技术保障。

参考文献

[1] 石海芹.逐梦电力前沿铸就行业先锋——记全国劳动模范、北京电力设备总厂有限公司新能源研究院常务副院长刘成柱[J].工会博览,2025,(21):34-36.

[2] 李翠翠,韩晓梅,周忠原.基于电力设备新能源并网技术探究[J].电工技术,2025,(S1):128-130+133.

[3] 董鹏程,阎凯.基于半监督SVM模型的新能源发电成套电力设备故障诊断方法[J].机电工程技术,2025,54(10):164-167.

[4] 任建强,王璐阳,吴家浩,倪顺江,翁文国.基于情景构建与推演的新能源电力设备运行风险评估[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(10):1571-1578.

[5] 钱永吉.新能源风电场电力设备防小动物措施的研究与探讨[J].中国设备工程,2021,(21):250-252.