

气体湿度对光声光谱油中溶解气体监测装置中乙炔含量的影响分析

喻诗婕, 魏俊杰, 林福海, 伍发元, 罗益辰

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要:光声光谱气体检测技术具有灵敏度高、检测速度快、检测范围宽、不消耗载气等优点,适用于电力系统变压器油中溶解气体的在线监测。针对某换流变光声光谱油中溶解气体在线监测装置乙炔误报警事件,搭建了一套基于动态顶空脱气和光声光谱检测的实验平台,并与安捷伦气相色谱仪离线检测结果进行对比,探索性分析了空气湿度对检测结果的影响,为进一步完善光声光谱技术在变压器油中溶解气体在线监测中的应用提供了技术支持。

关键词:油色谱在线监测装置;光声光谱;相对湿度;乙炔;油中溶解气体

中图分类号:TM 407 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2026)02-0057-07

0 引言

变压器是电力系统的重要组成部分,其运行可靠性影响着系统的安全性和稳定性。因此,监测变压器的健康状况是确保电网稳定运行的关键一步。油中溶解气体分析是监测充油类设备的重要手段,辅以在线监测技术,能够实时分析绝缘油中溶解气体含量变化趋势,诊断初期故障。传统气相色谱技术灵敏度高,检测范围广,但需要消耗载气,分析时间长,不适合在线监测。光声光谱技术^[1]具有响应时间快、检测灵敏度高、不需要载气等优点,适用于在线监测。

光声光谱在线监测装置在江西电网特高压站的试点已取得阶段性成果。然而,在实际运行过程中,受环境干扰、装置性能等因素影响,系统误报警现象频发,特别是环境湿度变化所造成的光声信号波动,但目前关于这方面的研究较少^[2],致因分析不清晰,为油色谱异常告警的研判和快速处置造成了阻碍。

在上述背景下,文中对一起换流变乙炔频繁误报警事件进行深入分析,搭建了一套可调节交变湿度的光声光谱油中溶解气体在线监测装置,利用该装置系

统地研究了交变湿度对光声系统性能的影响及其原因,提出了一系列防范措施,为解决同类误报警问题提供实操性方案。

1 事件概况

2025年9月21日,某换流站极I高YD-B换流变乙炔读数于00时开始发生异常波动,9月22日08时其数值上升至 $0.4 \mu\text{L/L}$,然后慢慢下降恢复到正常测试值,如图1(a)所示。装置厂家调取装置后台数据,乙炔读数和湿度波动时间如图1(b)所示,9月20日前,环境湿度在 $34\sim 36 \text{ g/m}^3$ 之间小范围波动,乙炔的数值保持不变为0;9月20日14:00左右,环境湿度突然下降到 29 g/m^3 左右又恢复,乙炔的数值开始上升;9月21日,数值开始陡增;在9月21日2:00至9月22日2:00期间,环境湿度出现了4次类似的突然下降,乙炔的数值在此期间持续攀升,并在9月22日2:00达到了峰值。如图2所示,类似的乙炔误报情况在2024年也曾出现,当环境湿度在一段时间保持较高的水平后,突然的湿度变化会引发乙炔数值的激增。

针对此类事件,需要开展相关实验,进一步探究

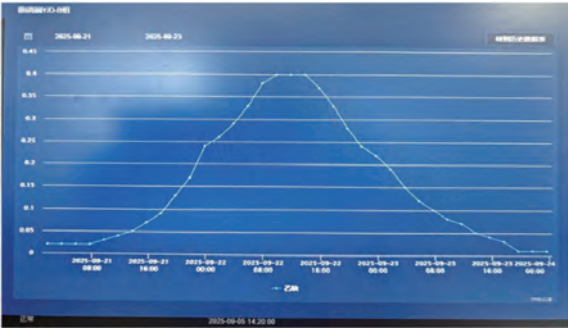
收稿日期:2025-11-10

作者简介:喻诗婕(2000),女,硕士,助理工程师,研究方向为电力化学。

故障分析

FAULT ANALYSIS

气体湿度对光声光谱油中溶解气体监测装置中乙炔含量检测的影响。



(a) 在线监测装置数值波动情况



(b) 乙炔数值随相对湿度变化图

图1 某换流变光声光谱油中溶解气体在线监测装置乙炔异常波动

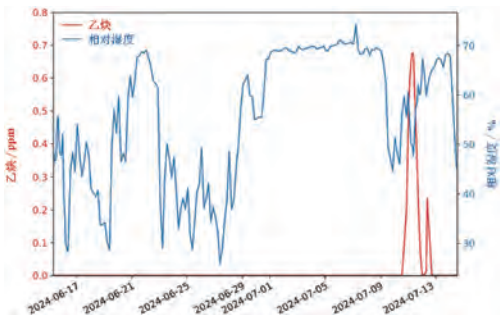


图2 某次光声光谱装置乙炔激增

2 实验情况

2.1 光声光谱装置工作原理

光声光谱仪器主要分为3个模块：油气分离、光声光谱检测 and 数据处理,如图3所示。在在线装置中,环境空气为背景气。装置的油气分离单元采用了动态顶空取气法,微型气泵循环吹定量空气入油中,通过搅拌后鼓泡等方法,使油中溶解气体在气、液两相间建立动态平衡,之后将脱出的气体送入光声光谱单元供检测。

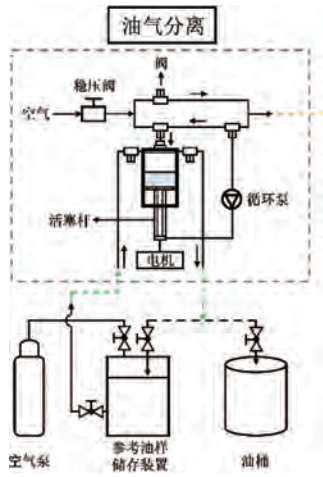


图3 油气分离单元工作原理

如图4所示,样本气体从油气分离单元取出后通入光声池。当光源通过抛物面反射镜聚焦后成为入射光,以恒定速率转动的调制盘对其实现频率调制后,由一组滤光片实现分光,各滤光片仅允许透过某一特定波长(对应于光声室内某特定气体分子的吸收波长)。经波长调制的红外线进入光声室后以调制频率反复激发某特定气体分子,体系中的分子能量转化为分子动能,引起气体温度局部升高,使密闭光声室内产生周期性压力波并由微音器进行检测。压力波频率由调制频率决定,其强度则仅与特征气体的体积分数有关。由气体体积分数与压力波强度的定量关系即可准确计量光声室中各气体组分的体积分数。该模块的精度决定于所取各种气体分子光谱及微音器的灵敏度。其中,光声信号可以表示为式(1)^[3]:

$$U(h)=\frac{(\gamma-1)GQ}{2\pi f}\sigma_{\text{abs}}cW_0R_{\text{Mic}}(h)$$

(1)

式中: γ 为气体质量热容比; G 为几何因子; f 为光声腔的共振频率; Q 为光声腔的品质因素; σ_{abs} 为质量吸收系数; c 为气体浓度; W_0 为光功率; $R_{\text{Mic}}(h)$ 为微音器灵敏度,是气体湿度的函数。

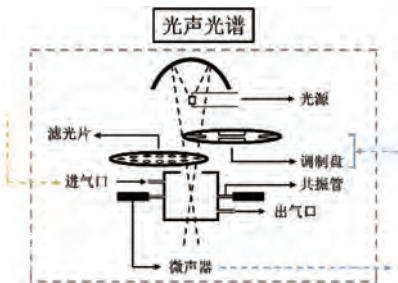
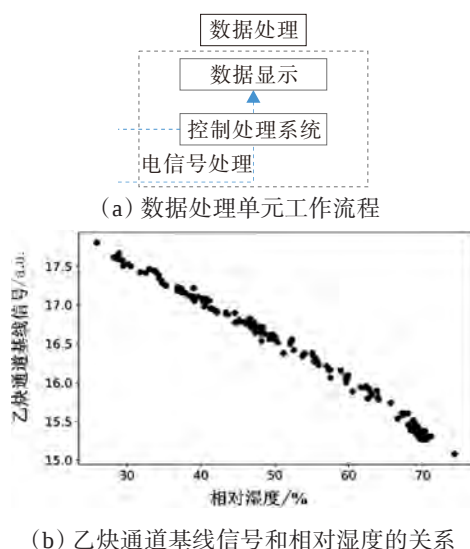


图4 光声光谱检测单元工作原理

如图5(a)和(b)所示,光声光谱的光声信号将传

输给数据处理单元。对于乙炔和相对湿度,可以很明显看出,乙炔通道的基线信号和相对湿度是负相关。乙炔通道的基线信号和相对湿度的这种线性相关性,将作为数据处理单元中的算法处理电信号的参考。



(a) 数据处理单元工作流程

(b) 乙炔通道基线信号和相对湿度的关系

图5 数据处理单元工作原理

2.2 试验设计

为进一步探究空气湿度变化对光声光谱油中溶解气体在线监测装置(以下简称“试验装置”)结果的影响,采用了CAMLIN T1G9的光声光谱装置,搭建了一套基于动态顶空脱气和光声光谱检测的温、湿度模拟试验平台,如图6所示。



(a) 试验装置外观



(b) 空气进气口置于箱内,箱内放置加湿器、温湿度计

图6 试验装置现场照片

根据《变电设备在线监测装置通用技术规范》(Q/GDW 1535—2015)^[4]、《电工电子产品环境试验第2部分:试验方法 试验 Db: 交变湿度》(GB/T 2423.4—2016)^[5]的要求,将试验装置的空气进气口置于密闭空间内,空间内放有加湿器来调控湿度,使用温湿度计来检测进气口的温湿度,同时利用空调维持整个实验室温度在20℃左右。

根据《变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范》(Q/GDW 10536—2021)^[6]中的参考油样浓度范围(见表1),配制3个不同乙炔浓度的试验油样(低浓度0.18 μL/L、0.31 μL/L,中低浓度3.22 μL/L),如表2所示,将装置测量结果与安捷伦7890B气相色谱仪离线检测结果对比,重点分析乙炔低浓度情况下湿度稳定/交变状态的测量特性。

表1 参考油样浓度范围

气体组分	油样(低浓度)	油样(中低浓度)
H ₂	2 ~ 20	50 ~ 100
C ₂ H ₂	0.2 ~ 1.0	1.0 ~ 5.0
ΣC ₁ +C ₂	2 ~ 10	50 ~ 100
CO	25 ~ 100	300 ~ 600
CO ₂	25 ~ 500	1 000 ~ 3 000

表2 实验油样的实验室测试结果

气体	油样1	油样2	油样1
C ₂ H ₂	0.18	0.31	3.22

2.3 实验结果

1) 装置在稳定相对湿度下的测量情况

乙炔、总烃在各湿度条件下测量重复性和误差,装置应符合Q/GDW 10536—2021中的要求,750 kV及以上变电站装置的测量重复性不大于3%。保持环境湿度稳定在50%-60%,对低浓度油样1和中低浓度油样1的装置重复性进行检测。由表3、表4和表5可知,低浓度油样1在环境湿度相对稳定的情况下,乙炔测量值相对标准偏差>3.0%,总烃的重复性<5.0%,说明这个乙炔浓度下,装置的测量重复性不够好;中低浓度油样1在检测器湿度变化不大的情况下,乙炔测量值稳定,乙炔重复性<3.0%,说明装置在较高乙炔浓度下,能保持较好的重复性。

表3 低浓度油样1的的试验结果

气体	测量1	测量2	测量3	测量4	测量5	测量6
C ₂ H ₂	0.54	0.52	0.53	0.59	0.53	0.53
总烃	9.64	9.52	9.33	9.59	9.53	9.03

表4 中低浓度油样1的试验结果

气体	装置测量结果					
	测量1	测量2	测量3	测量4	测量5	测量6
C ₂ H ₂	2.32	2.36	2.25	2.34	2.33	2.29
总烃	42.02	41.66	42.35	42.74	44.43	42.09

表5 两个油样的乙炔重复性和误差

油样	相对标准偏差/%	绝对误差/(μL/L)
低浓度油样1	4.38	0.38
总烃中低浓度油样1	2.16	-0.91

2) 装置在交变相对湿度下的测量情况

对于低浓度油样1(乙炔浓度为0.18 μL/L),从图7中可以看出,在测试周期内,相对湿度的波动对乙炔的实验测量值产生了明显的扰动。当相对湿度在70%~80%内上升时,乙炔的装置测量结果呈现出先升后降的趋势;当相对湿度跃升至100%并维持稳定时,乙炔的实验测量值降低后保持平稳;而当相对湿度从100%回落时,乙炔反而急剧上升。乙炔的测量值和相对湿度表现出明显的负相反特性;同时,可以发现,在相对湿度较大时,装置测量值与实验室测量值更为接近。

对于低浓度油样2(乙炔浓度为0.31 μL/L),在图8中可以看出,在测试周期内,相对湿度的波动对乙炔的实验测量值的影响相较于低浓度油样1大幅度减小,乙炔的实验测量值变化波动变小。而且,当相对湿度出现先升高稳定后下降的变化时,乙炔实验测量值也表现出正相关特征。这说明装置在油样乙炔低浓度情况下,数值会受相对湿度影响小范围波动,呈现出一定程度的正相关。

对于中低浓度油样1(乙炔浓度为3.22 μL/L),在图9中可以看出,乙炔的实验测量值在相对湿度大幅波动的情况下整体保持稳定,未出现大的波动。装置表现出较好的检测重复性。

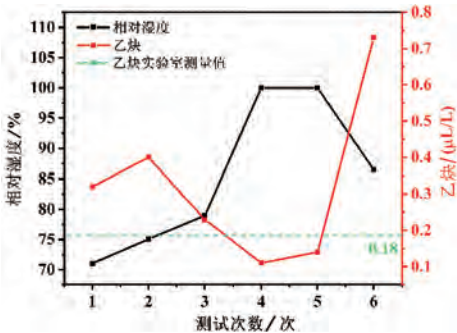


图7 相对湿度变化下低浓度油样1的乙炔变化情况

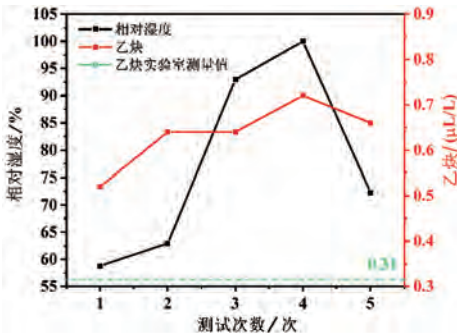


图8 相对湿度变化下低浓度油样2的乙炔变化情况

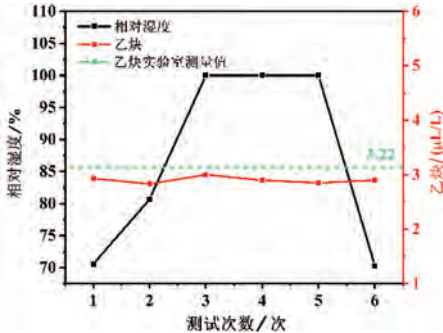


图9 相对湿度变化下中低浓度油样1的乙炔变化情况

3 原因分析

3.1 相对湿度对装置测量值的影响

通过上述试验可以发现,利用光声光谱装置对乙炔气体进行测量时,对于低乙炔气体浓度的油样,相对湿度对于测量的精度存在较大的影响。这主要是由于以下几点:

1) 水分子对乙炔分子弛豫影响

光声光谱气体检测作为基于光声效应的间接检测技术,其核心原理是碰撞弛豫过程的高效能量转换:待测气体分子吸收特定波长的调制光子能量后,通过无辐射碰撞弛豫过程,将光能转化为热能;由于激发光源的周期性调制,气体介质产生同步的热胀冷缩效应,从而激发出可探测的声波信号,这使得气体浓度信息被编码于声波信号中。系统的总体光声转换效率可以表示为式(2)^[7]:

τ⁻¹ = ∑ δ_iτ_{M - M_i}⁻¹ (2)

式中:τ为光声系统总弛豫时间;δ_i为各影响组分的体积分数;τ_{M - M_i}⁻¹为M_i分子对于M分子的弛豫时间。油中溶解气体的分子碰撞弛豫属于非同类分子之间V-T能量的交换。对于该弛豫过程,V-T能

量转移速率相对振动-振动能量转移速率较低,通常为系统的弛豫控制速率。光声信号的大小 S_{PA} 可以表示为式(3)^[7]:

$$S_{PA} = \frac{C_{cell} \delta \alpha P}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \quad (3)$$

式中: C_{cell} 为池常数; δ 为待测气体体积分数; α 为待测气体吸收系数; P 是激光功率; ω 是激发的光声信号频率。对于波长调制光谱检测技术,光声信号频率为激光调制频率的2倍。只有当待测气体分子的V-T能量转移速率远高于激光调制频率,即满足 $\omega \tau \leq 1$ 的条件时,才能产生较高的光声信号。然而水分子之间存在强烈的氢键,氢键的存在会加速分子的V-T能量转移速率,从而提升光声信号。因此,相对湿度高时,乙炔的信号表达更强。

2) 多组分气体对光谱吸收的交叉干扰影响

变压器油中溶解的特征气体主要有氢气、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、乙烷、乙烯和乙炔,除氢气外的其他气体均吸收红外光。因此,变压器油中溶解的特征气体为多组分,光声光谱检测装置需分析多组分气体样品而不是单一组分。

当不同的气体分子具有相似的结构特征(如含有相同官能团)时,它们的光谱特性往往表现出较高的相似性,吸收光谱的谱线会存在重叠现象,这种现象会显著影响气体检测的准确性,尤其是在多组分混合气体的分析中需要特别注意。参考美国国家标准公司化学书中光谱数据库提供的气体红外吸收数据,计算450~4 000 cm^{-1} 波数范围内上述特征气体的谱线分布情况,如图10所示。可以发现,乙炔的吸收光谱在675~750 cm^{-1} 附近与水分子和二氧化碳的吸收光谱重叠;在750~800 cm^{-1} 附近与水分子的吸收光谱重叠;在1 250~1 400 cm^{-1} 附近与甲烷的吸收光谱重叠;在3 200~3 370 cm^{-1} 附近与水分子的吸收光谱重叠。为同时保证强吸收信号表达和减少其他气体干扰,可选用的波段为750~800 cm^{-1} 和3 200~3 370 cm^{-1} 。

由此发现,乙炔的滤光片可选取的波段受限严重,检测出的电信号值会受到其他气体的干扰,使得检测信号不仅为乙炔气体信号,同时也包含非待测气体信号,这导致最终得到的乙炔浓度不准确。

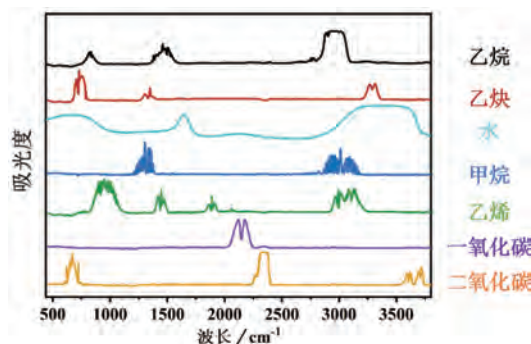


图10 多组分气体的红外吸收光谱

3) 相对湿度对微音器灵敏度的影响

微音器是光声光谱检测单元中的关键部件,其输出的电信号与极板间气体介电常数有关,而极板间气体湿度发生变化时,微音器输出电信号的电压幅值不是恒定的而是随气体湿度波动。气体湿度越大,气体介电常数就越大,电容式微音器的灵敏度也就越高。微音器的共振频率如式(4)^[8]:

$$f = \frac{c_s}{2} \sqrt{\left(\frac{j}{L_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{mn}}{R_c}\right)^2} \quad (4)$$

本征值 (j, m, n) 分别代表纵向、角向和径向模式数, L_{eff} 、 R_c 分别为共振腔的有效长度和半径, c_s 为介质中的声速, α_{mn} 为 m 阶贝塞尔函数的第 m 个根除以 π 。而在潮湿空气中的声速可以通过式(5)进行修正^[9]:

$$c_s = \sqrt{\gamma \frac{RT}{29 - 11h}} \quad (5)$$

式中: R 为气体常数; T 为空气的绝对温度; γ 为空气的定压比热容与定容比热容之比; h 为空气中水分子的分压。随着湿度变大, h 增大,声速也会相应变大,从而放大微声器的共振信号。

而且,相对湿度越大,空气对声信号的衰减越弱,传递至微音器处的声能量越强。所以,当环境湿度过大时,微音器灵敏度很高,能识别微小的乙炔信号波动,当乙炔浓度比较低时,微小的波动也会造成数值的快速变化。

3.2 光声光谱乙炔误报可能的原因分析

1) 低浓度油样2的乙炔变化趋势可以归结于相对湿度对装置测量精度的影响。随着相对湿度的增长,乙炔的信号表达更强,光声光谱在线装置对乙炔信号的响应也更为灵敏,因此,装置的乙炔测量结果会略微增长,不过变化幅度不大。

2) 与低浓度油样2形成鲜明对比的就是,低浓度

油样1的变化与相对湿度的变化为负相关。相对湿度增长,但乙炔的装置测量结果反而变小,这可能是因为:

(1) 湿度检测器的响应不及时。以环境空气为背景气的光声光谱检测装置需要在每一次正式检测前,先取空气来去除背景气的影响,而湿度检测器可能无法及时准确地反映短时间内的湿度大幅度变化,导致乙炔通道的基线信号出现偏差;又因为数据处理模块中会内嵌算法,消除相对湿度对微音器共振频率的影响,所以湿度检测器的错误信号也会造成乙炔测量结果出错。

(2) 滤光片的分光偏差。因为乙炔的滤光片可选取的波段受限严重,无法完全排除其他气体的吸收干扰,所以如果精密的滤光片在使用过程中透光波长范围发生偏移,会对输出的吸收信号造成较大的影响。

(3) 前置算法的不适用。光声光谱在线装置的内嵌算法是通过前期试验得到的。通过拟合乙炔通道的信号和相对湿度的线性相关性,数据处理单元将总结出特定的规律处理电信号。但是,这些规律是在湿度变化相对温和的情况下得到的,当湿度剧烈变化时,这种算法规律将不再适用,最终造成了算法的过补偿和欠补偿。

(4) 光声光谱单元中光声池的透光窗口可能存在结露的情况。通过低浓度油样1的情况可知,当湿度保持在一个比较高的水平后突然下降,乙炔的数值会出现激增,这可能是因为气体湿度过大,光声池的透光窗口表面结露,这使得光透过率降低。当环境相对湿度降低后,光声池透光窗口表面的露珠不断蒸发使得光透过率增加,光声信号幅值增大;同时,因为光声池中的实际相对湿度在短时间内仍保持在较高的水平(因为露水未完全蒸发),所以微音器输出的光声信号强度依旧很大。这两个因素均造成了在短时间内测量值上升,最终导致了乙炔数值的异常激增。

这些影响在油样乙炔浓度较小的情况下,就会造成偏离本征值过大的偏差,最终引发光声光谱在线装置的乙炔误报。

4 建议及措施

基于以上空气湿度对光声光谱油中溶解气体在线监测装置乙炔含量的影响分析,应优化湿度补偿算

法、定期监测检查装置的湿度检测器和滤光片状况、连续监测检测器湿度、双重化配置、优化装置外部进空气管路的湿度控制等,具体措施如下:

1) 改进乙炔测量中的湿度补偿算法,对出现误报的装置更新优化后的光声光谱算法配置文件,目前每次较长时间的误报均会督促厂家发日志回英国,并更新算法。

2) 每个湿度检测器和滤光片对湿度的抵抗能力有差异,存在老化情况,需要定期调取日志,检查湿度检测器和滤光片运行状况,必要时对光声光谱 PGM 测量模块(光源、检测器等)进行整体更换,目前从今年更换模块的3台装置来看,监测数据均较稳定。

3) 增加检测器湿度信号远传至监控后台,实时监测、综合判断,研发一种可靠的算法,用于判断乙炔异常是否为空气湿度变化导致,提高乙炔告警准确率,便于及时采取快速处置的运维策略。

4) 根据国网设备变电[2023]56号文附录5《特高压变压器(高抗)油中溶解气体在线监测装置双重化配置方案》中“两套装置不能同时为光声光谱原理”的相关要求,建议配置另一套色谱原理的在线装置,为油色谱异常告警的精准研判提供“双保险”。

5) 研制一套免维护的空气自干燥净化装置,装在检测器进空气的管道前端,采取“一用一再生”的模式,实时确保恒定湿度的空气源,避免乙炔监测数据的误报。

5 结语

文中对一起换流变乙炔误报事件进行深入分析,搭建了一套可调节交变湿度的光声光谱油中溶解气体在线监测装置,利用该装置研究了交变湿度对光声系统性能的影响。在一定的乙炔浓度范围以上(乙炔 $>0.31\text{ }\mu\text{L/L}$),装置的测量值能保持一定的准确性和重复性。但在低乙炔浓度下(乙炔 $<0.31\text{ }\mu\text{L/L}$),相对湿度较短时间的剧烈波动将造成数据处理单元的背景补偿机制出错。湿度在高水平保持一段时间后突然降低时,又会因为透光窗口结露而发生乙炔数值的异常升高。为此,应该定期监测检查光声光谱油中溶解气体在线监测装置的湿度检测器和滤光片,优化装置内部的温湿度控制,优化湿度补偿算法。

此次深入分析气体湿度对光声光谱油中溶解气体监测装置中乙炔误报的影响,为油色谱异常告警的精准研判和快速处置提供重要依据。为了进一步提升在线监测数据的准确性和可靠性,保障电网安全稳定运行,未来应进一步开展深入研究。

参考文献:

- [1] 张华威.运用光声光谱技术的变压器油中溶解气体检测研究[J].机电技术,2018(02):96-100,117.
- [2] 刘丽荣.光声光谱技术在变压器油中气体监测中的应用思路介绍[J].光源与照明,2022(03):86-88.
- [3] 沈恩泽,张周胜,张磊.变压器油中溶解气体光声光谱检测交叉干扰抑制方法研究[J].仪表技术与传感器,2022(10):

104-110,115.

- [4] 国家电网公司.变电设备在线监测装置通用技术规范:Q/GDW 1535—2015[S].北京:中国电力出版社,2015.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局.电工电子产品环境试验第2部分:试验方法 试验 Db:交变湿度:GB/T 2423.4—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [6] 国家电网公司.变压器油中溶解气体在线监测装置技术规范:Q/GDW 10536—2021[S].北京:中国电力出版社,2021.
- [7] 莫冰玉,周尚虎,韩梦龙,等.水气对光声光谱油中甲烷检测的影响特性研究[J].激光技术,2025,49(04):544-550.
- [8] 蒙瑰,刘先勇,袁长迎,等.光声光谱气体检测系统中气体湿度的影响研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(07):1819-1822.
- [9] 都小凡,钱仙妹,刘强,等.相对湿度对光声信号的影响研究[J].光学学报,2017,37(02):323-330.

(上接第30页)

参考文献:

- [1] 舒印彪,张正陵,汤涌,等.新型电力系统构建的若干基本问题[J].中国电机工程学报,2024,44(21):8327-8341.
- [2] 倪子瞻,罗颖婷,江俊飞,等.基于自适应扩展卡尔曼滤波的变压器顶层油温多时间尺度预测[J].电网技术,2024,48(10):4397-4406.
- [3] Yang J, Lu W, Liu X. Prediction of top oil temperature for oil-immersed transformers based on PSO-LSTM[C]. International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering, 2021:278-283.
- [4] An P. EMD-CPO-GRU-based Transformer Oil Temperature

Prediction[J]. Journal of Computer Science and Artificial Intelligence, 2025, 2(02): 69-76.

- [5] 江星星,宋秋昱,杜贵府,等.变分模式分解方法研究与应用综述[J].仪器仪表学报,2023,44(01):55-73.
- [6] 李启明,李彬,刘浩,等.基于自监督预训练与时序注意力机制的变压器顶层油温预测[J].中国电机工程学报,2024,44(增刊1):318-331.
- [7] 吴建华.基于深度学习分位数回归的行程时间概率分布预测研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [8] Zhou H, Zhang S, Peng J, et al. Informer: beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2021, 35(12): 11106-11115.
- [9] 李锦程.基于门控循环单元的短期风电功率预测研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.

(上接第52页)

- [6] 田德,吴晓璇,苏怡,等.基于改进社交网络搜索算法的永磁同步电机参数辨识[J].太阳能学报,2025,46(04):604-611.
- [7] 周冬冬,蓝上海,高远,等.风力发电机组转速自适应滤波算法的设计与实现[J].船舶工程,2024,46(增刊2):48-51.
- [8] 谭科,肖海华,张宏志,等.基于电氢耦合消纳的陆海一体化电网架构及其近海风电效力——以广东近海电网为例[J].资源科学,2025,47(04):718-729.
- [9] 陈亚龙,楼冠男,姬联涛,等.基于i-C&CG算法的风光蓄自适应两阶段鲁棒优化调度方法[J].电力科学与技术学报,

2025,40(03):141-153,173.

- [10] 叶方慧,熊国江,杨墨昕,等.基于增强型鲸鱼优化算法的交直流互联配电网经济调度[J].现代电子技术,2024,47(18):15-21.
- [11] 洪国庆,吴国旻,金宇清,等.电力系统风力发电建模与仿真研究综述[J].电力系统自动化,2024,48(17):22-36.
- [12] Park H P, Chang S J, Park J Y, et al. DC series arc fault detection method with resonant filter design for PV systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(11): 14240-14250.