

检验与测试

极早期电力环境臭氧气体监测技术及其应用研究

王喆¹, 张军侠², 方勇³, 高国梁¹, 张维军¹, 成昱嘉¹, 白洁¹

(1 国网陕西省电力公司榆林分公司, 陕西 榆林 719000;

2 陕西蓝河电气工程有限公司, 陕西 西安 710119;

3 陕西延长石油榆林煤化有限公司, 陕西 榆林 719100)

摘要: 利用先进技术手段对高压开关柜做出状态监测及评价, 有利于其安全运行。提出极早期电力环境气体实时监测概念, 分析了臭氧浓度与气体放电的关系。介绍了臭氧的监测方法及器件, 构建模拟实验设备研究了外施电压、施压持续时间、环境湿度等因素对封闭环境中臭氧浓度的影响, 并给出了一种极早期电力环境气体实时监测装置的具体应用, 为高压开关柜等电力设备的状态评价提供一个新的思路和视角。

关键词: 电力环境; 臭氧; 监测; 状态评价; 高压开关柜

中图分类号: TM591 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-3175(2021)12-0043-05

Research on Early Power Environmental Ozone Gas Monitoring Technology and Its Application

WANG Zhe¹, ZHANG Jun-xia², FANG Yong³, GAO Guo-liang¹, ZHANG Wei-jun¹, CHENG Yu-jia¹, BAI Jie¹

(1 Yulin Branch of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd, Yulin 719000, China;

2 Shaanxi Lanhe Electronic Engineering Co., Ltd, Xi'an 710119, China;

3 Shaanxi Yanchang Petroleum Yulin Coal Chemical Company, Yulin 719100, China)

Abstract: This work used an advanced technical method to monitor and evaluate the condition of the high-voltage switchgear cabinet. The result of it would help the safe operation of the high-voltage switchgear cabinet. This paper proposed a very early concept about real-time monitoring under a power environment. It analyzed the relationship between ozone concentration and electrical discharge. This paper detailed the methods and devices of ozone monitoring. Besides, it constructed simulation experiments for investigating the influence on ozone concentration in a closed environment. Many methods have been used to do simulation experiments, such as the size of impressed voltage, the duration of impressed voltage, ambient humidity. The specific application of a very early real-time monitoring device for power environmental gas is given, which provides a new idea and perspective for the condition evaluation of power equipment such as high-voltage switchgear cabinet.

Key words: power environment; ozone; monitoring; status evaluation; high-voltage switchgear cabinet

0 引言

高压空气绝缘开关柜作为基层高压配电设备, 使用极其广泛, 数量极其庞大, 产品依据的主要标准为 IEC 62271-200、GB/T 3906 或更加严格的行业标准, 例如“DL/T 404 3.6 ~ 40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备”。高压开关柜的安全运行直接关系到人们的用电体验及生产生活。在电力系统, 目前高压开关柜一般按照“DL/T 596 电力设备预防性试验规程”定期进行检修及维护, 当然若

出现突发事故, 则必须临时安排事故抢修并及时恢复供电。定期维护需要耗费大量人力、物力及时间, 一部分设备未到检修周期即出现故障, 而很多设备到了检修周期“身体状况”依然良好。

对于现代配电系统, 如何利用先进技术手段对电力设备做出状态监测及评价, 并据此指导电力设备的状态检修, 已成为电力科研人员的工作重心之一。通过极早期高压开关柜电力环境气体的实时监测, 限于篇幅文中将着重聚焦于臭氧的监测, 以期电力设备的状态评价及状态检修提供新的思路和视角。

作者简介: 王喆(1980—), 男, 高级工程师, 本科, 从事电力系统及电力设备的分析与保护工作。

1 极早期电力环境气体实时监测的概念

电力设备的失效或损坏很多都缘于各相导体之间或某相导体对地绝缘的破坏,由此将不可避免的引发短路事故。而在短路事故发生之前相当长的一段时间内,在电力设备内部起绝缘作用的空气即电力环境气体已经发生了变化,例如臭氧(O₃)浓度异常、烟雾粒子浓度异常、一氧化碳(CO)含量异常、温度异常等。若采用适用的传感技术(例如动力吸气采样技术)对上述电力环境气体指标或参数进行实时监测并将数据发送到用户管理平台,运行人员将各参数的历史数据和实时数据进行比对,或依据经验阈值对超出范围的参数进行提示性告警引起运维值班人员的关注,则有可能在极早期发现故障隐患并及时做出响应,避免重大事故或规避人员安全风险,缩短运行维护及停电时间,对供电安全多一份保障。极早期电力环境气体实时监测的具体内涵如下:(1)臭氧浓度,对应于电场集中导致的气体放电、电弧放电、局部放电等^[1];(2)烟雾粒子浓度,对应于电气火灾、电缆过热、绝缘材料阴燃等;(3)一氧化碳浓度,对应于有机材料、高分子复合材料或环氧材料阴燃等;(4)温度,对应于导电回路温升过高或其他不正常热源的存在等;(5)湿度,对应于环境空气过湿、开关柜电缆孔封堵不严、电缆沟进水等。

2 电力环境气体中的臭氧监测

2.1 气体放电与臭氧的内在联系

正常大气中气体成分是比较稳定的,按体积分数计算:氮气(N₂)约占78%,氧气(O₂)约占21%,稀有气体约占0.94%(氦He、氖Ne、氩Ar、氪Kr、氙Xe、氡Rn),二氧化碳(CO₂)约占0.03%,还有其他气体和杂质约占0.03%,如臭氧(O₃)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO₂)、水蒸气(H₂O)等。但在高压开关柜内的空气,由于受到电场的作用,情况会有所不同。带电粒子在电场作用下获得较高能量,与空气中的O₂发生剧烈碰撞,打破其分子键,电离出氧原子^[2-4]:



这些氧原子向周围扩散,与氧气发生化学反应生成臭氧^[5-6]:



式中e为电子,M为其他气体分子,如氮、二氧化碳气体分子等。

臭氧在常温常压下的稳定性极差,含量为1%以下的臭氧在空气自行分解的半衰期约为20~30 min。



在正常状态下,开关柜内的上述过程会达到一个平衡,也就是说臭氧浓度会恒定在一个较低的水平上。由于某种原因导致电场集中、局部放电加重、比较显著的爬电或者在绝缘介质击穿前期,上述电离出氧原子及合成臭氧的过程就越强烈,并导致柜内臭氧浓度会在较高的水平下达到新的平衡或者持续走高直至绝缘击穿。

2.2 臭氧的检测方法及器件

臭氧浓度检测按原理可分为紫外吸收型、半导体气敏传感器型、电化学传感器型及化学变色型4种^[7]。图1为一种半导体臭氧传感器检测电路。半导体臭氧传感器低浓度检测范围 $10 \times 10^{-9} \sim 1\,000 \times 10^{-9}$,高浓度检测范围 $10 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$ 。该传感器所使用的气敏材料为半导体金属氧化物(三氧化钨),这种材料在清洁空气中的电导率较高,当所处环境中存在臭氧时其电导率则随着空气中臭氧浓度的增加而线性减小,即图1中输出电压 U_0 与臭氧浓度之间存在线性关系。

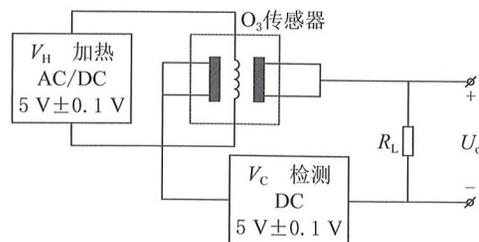


图1 半导体臭氧传感器检测电路

图2为一种电化学臭氧传感器检测电路。电化学的检测原理主要是臭氧气体进入传感器内部,在感应电极处发生化学反应时产生的电流与其浓度成正比并遵循法拉第定律,通过测定电流的大小就可以确定臭氧气体的浓度。该传感器实际上是由感应电极和负电极组成的一个燃料电池,相当于一个电流源,此电流正比于环境中的臭氧浓度,通过适当的电路将此电流转换为电压信号,检测此电压信号就可得知臭氧浓度。此类传感器无需保养,低功耗、高精度、高灵敏度、线性范围宽、抗干扰能力强、优异的重复性和长期稳定性。图2中 U_1 为低功耗

放大器, R_T 为温度补偿热敏电阻。放大器采用低功耗的芯片, 用热敏电阻进行温度补偿, 将电化学检测技术与精良的电路设计紧密结合, 测量精度高、线性度好。

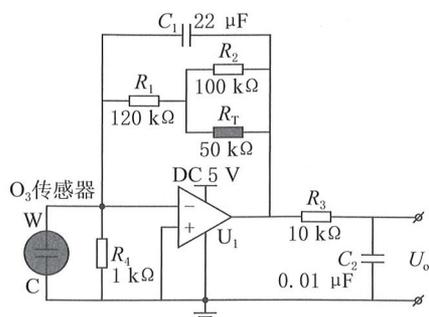


图2 电化学臭氧传感器检测电路

2.3 影响臭氧浓度的主要因素

2.3.1 模拟实验系统

为研究空气中放电过程与臭氧浓度的关系, 搭建了针-板电极结构的模拟实验系统。如图3所示, 采用容积约 32 L 的全封闭透明储物箱, 内置一对针-板电极模拟尖端放电, 针电极直径 $\phi 3.0$ mm, 板电极表面尺寸 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$, 两电极间距离为 30 mm。采用调压器、升压变及限流电阻搭建起高压发生器, 并将高压引线连接到针-板电极上, 透明储物箱的一角放置一台电池驱动的微型加湿器可随时改变箱内空气湿度, 一根毛细气体采样管连通箱体及气体监测装置, 气体监测装置内置微型轴流风机可从箱体内抽取气体进行检测。

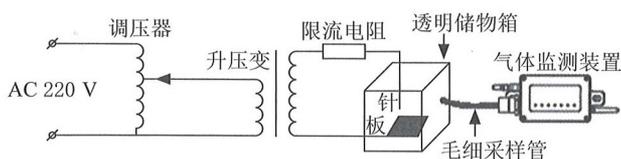


图3 模拟放电故障升压测试回路

2.3.2 臭氧浓度随电压的变化

在空气相对湿度 45%、温度 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 的室内条件下, 对图3中的针-板电极分别施加 6、8、10、12、14、16 kV 的电压, 每个等级电压持续施加时间 5 min, 6 ~ 16 kV 均为电晕放电, 无放电火花, 每个电压等级试验完后, 待臭氧释放完再进行下一个电压等级试验。监测结果如图4所示, 初始空气中臭氧浓度体积含量接近于 $0 \sim 7 \times 10^{-9}$, 施加高电压后很快即可检测到臭氧浓度的变化, 当电压提高到 12 ~ 16 kV 时, 臭氧含量的上升陡度明显增大。可以看到, 监测到的臭氧含量随着施加电压升高呈

现单调增加的趋势。

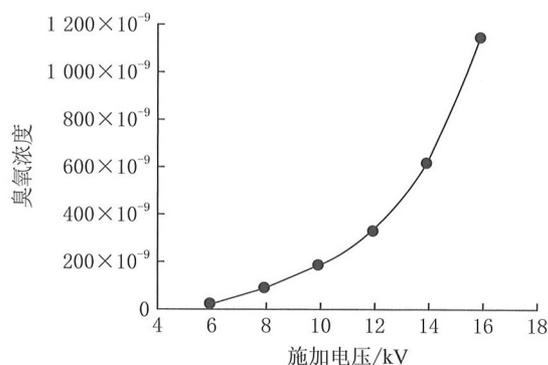


图4 施加电压值对臭氧浓度的影响

2.3.3 臭氧浓度随电压持续时间的变化

采用图3所示的模拟实验系统, 在空气相对湿度 45%、温度 $24\text{ }^\circ\text{C}$ 的室内条件下, 在针-板电极间施加 8 kV 电压, 放电持续时间 5、10、15、20 min 时臭氧浓度的变化如图5所示。可以看出在第一阶段初始放电的前 5 min 臭氧浓度增长速率很快, 第二阶段 5 ~ 10 min 时臭氧浓度上升速率略有下降, 第三阶段 10 ~ 20 min 时臭氧浓度增长趋于平缓, 表明此时臭氧的合成和分解达到平衡, 所以第三阶段放电时臭氧浓度保持基本稳定。

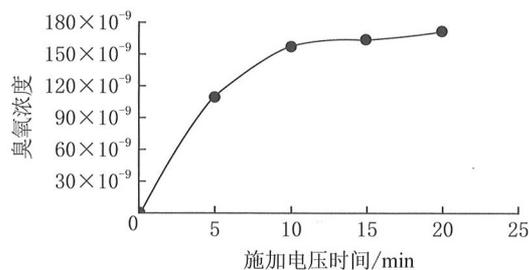


图5 持续施加电压 8 kV 时臭氧浓度的变化

2.3.4 空气湿度对臭氧的影响

采用图3所示的模拟实验系统, 为研究空气湿度对臭氧浓度的影响, 通过模拟针-板局部放电的方式对不同湿度条件下放电产生的臭氧浓度进行检测。在设定的湿度条件下分别试验 4 个电压 6、8、10、12 kV, 每个电压持续时间 5 min, 分别记录臭氧浓度值, 待臭氧释放完后再进行下一个电压等级试验。上述试验在相对湿度 44%、53%、60%、70%、80%、85% 条件下分别进行。试验结果如图6所示, 可以看出, 在相同电压下湿度 44% ~ 53% 条件下臭氧浓度随空气湿度增大而增大, 而湿度 60% ~ 85% 条件下臭氧浓度随空气湿度增加而降低, 施加电压为 10、12 kV 时湿度影响尤为明显。

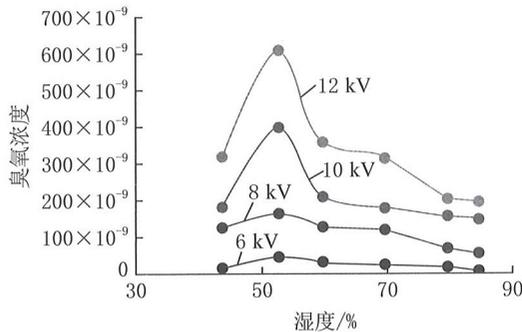
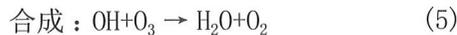
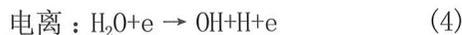


图6 不同湿度下臭氧浓度变化情况

一方面,水汽的存在会加剧绝缘材料表面及空气的放电,这会导致臭氧浓度增加,反应式见式(1)和式(2)。另一方面,水汽在电场作用下会发生电离及合成两个反应^[8]:



显然,式(4)和式(1)两个反应存在争夺电子的竞争关系,而式(3)和式(5)则与式(2)存在抵消关系,过多的水汽则会加剧这种竞争关系和抵消关系。所以必然存在一个对应于臭氧浓度最大值的空气湿度,进一步提高湿度则臭氧浓度将呈单调下降趋势,这并不一定预示着这种下降对电气绝缘会更加有利,因为这是以放电加剧为代价的,而放电加剧将导致绝缘材料加速老化而失效,所以通过臭氧浓度并结合空气湿度的监测来作出综合判断可能是必须的。

3 一种电力环境气体实时监测装置

3.1 电力环境气体数据采集模块

此模块采用外部DC24V供电,基于现代传感器技术,硬件框图见图7,利用低功耗单片机实现对O₃、烟雾粒子、CO、温度、湿度等的数据采集并进行逻辑计算处理、LED报警指示,可通过隔离型RS485接口或LoRa无线模块与远方装置通信。

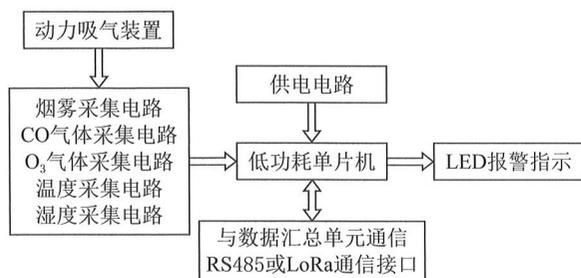


图7 数据采集模块硬件框图

该模块配置了前置过滤型进气接口及动力吸气装置,极大提高了响应的快速性及准确性,当检测数据超出预设的报警阈值,则可根据超限程度由LED发出1~10Hz闪烁报警信号并主动上传数据。

此模块一般安装在高压开关柜的母线室、电缆室、断路器室,或者通过管路采样系统安装于开关柜柜顶,图8为此模块的外形及在KYN61-40.5型高压开关柜上安装的示意图。

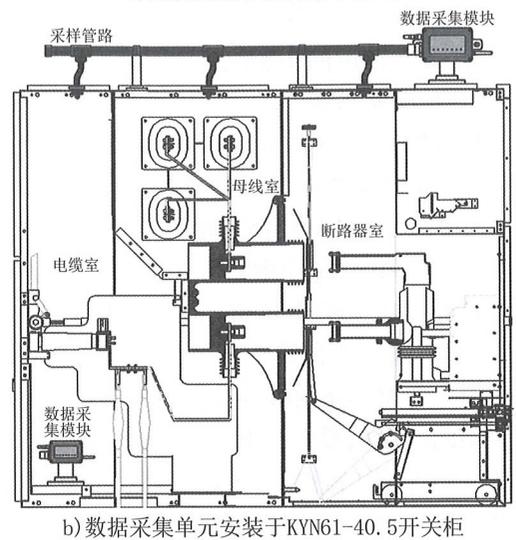
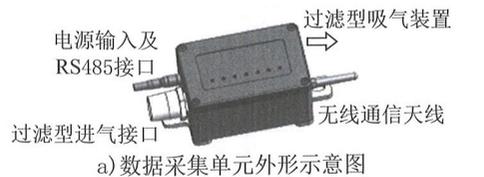


图8 电力环境气体数据采集模块外形参考图

3.2 系统组网

分布在高压配电室各高压开关柜内部的电力环境气体数据采集模块通过LoRa无线芯片或RS485接口将气体参数发送给图9中的数据汇总单元。

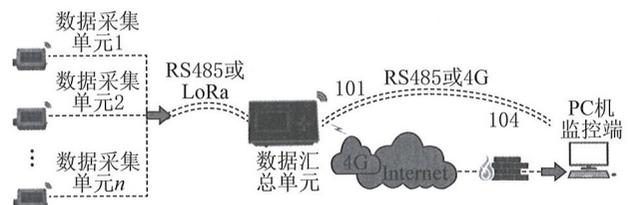


图9 系统组网示意图

数据汇总单元利用高性能单片机实现对数据进行汇总、显示、设定、远传、报警、SOE等处理,该单元采用外部AC220V或DC220V供电,采用隔离型RS485或4G无线模块与远方数据监控云平台或用户后台计算机通信。数据汇总单元检测到数据的指标超出设定阈值也通过本地的LCD、LED、蜂

鸣器或继电器发出报警信号。

数据采集模块与数据汇总单元之间的通信方式,用户根据现场需求选择一种方式通信。当工程项目开关柜数小于或等于 20 面时,可以选用无线 LoRa 通信,此时建议将数据汇总单元置于开关柜队列的中部区域,以便可靠接收数据;当工程项目开关柜数大于 20 面时,若采用无线 LoRa 通信,则可能需要多台数据汇总单元,以保证数据传输的可靠性;上述两种情况均可不采用无线 LoRa 通信而选用有线 RS485 通信,此时单台数据汇总单元可连接最多 32 台数据采集单元。数据汇总单元可通过 RS485 接口或者 4G 无线通信模块与用户各自的后台 PC 机连接通信。与远方监控平台通信建议选配 4G 模块,与本地 PC 通信建议选用 RS485。

4 现场运行及数据分析

电力环境气体实时监测装置在榆林某 110 kV 变电站 35 kV 开关柜项目中投入运行。电力环境气体实时监测装置在 6 台 35 kV 开关柜电缆室中运行监测数据见表 1。由表 1 可知,电力环境气体实时监测装置所监测的 6 台 35 kV 开关柜电缆室环境及气体数据,烟雾、CO 浓度均为 0,柜内有微量 O₃ 气体,温度和湿度均在正常范围内,运行维护人员可通过监测数据评估此阶段开关柜内设备状态运行良好。

表1 监测数据表

开关柜编号	烟雾	CO	O ₃	温度/℃	湿度/%
3502	0	0	70×10 ⁻⁹	27	35
35002	0	0	28×10 ⁻⁹	27	34
3692	0	0	7×10 ⁻⁹	28	32
3693	0	0	93×10 ⁻⁹	24	39
3694	0	0	39×10 ⁻⁹	24	38
3695	0	0	14×10 ⁻⁹	25	38

5 结语

文中提出了极早期电力环境气体实时监测概念,分析了臭氧浓度与气体放电的关系,介绍了臭氧的监测方法及器件,构建模拟实验设备研究了外施电压、施压持续时间、环境湿度等因素对封闭环境中臭氧浓度的影响,并给出了一种极早期电力环境气体实时监测装置的具体实践。在此,将一些相关的概念或初步结论汇总如下:(1) 高压开关柜内

带电体出现局部电场集中、电压等级提高、绝缘器件表面爬电、局部放电加剧等都会导致臭氧浓度增加。(2) 在一定的放电条件下,相对封闭的电力环境气体中臭氧浓度将在数十分钟之内达到平衡,放电条件改变后臭氧浓度将达到新的平衡,若臭氧浓度过高或持续上升,则存在较大的绝缘风险。(3) 空气湿度对臭氧浓度的影响并不是单调的,随着湿度增大臭氧浓度先是单调增加,到达峰值后湿度若继续增大则臭氧浓度呈单调下降趋势。但这并不意味着高湿度会有利于电气绝缘,相反高湿度会加剧放电或爬电,此时相对低的臭氧浓度并不能阻止绝缘介质的快速老化或破坏。(4) 电力环境气体监测可对极早期电气火灾、电气过热或阴燃隐患、绝缘故障做出预警,为电力企业带来明显的安全效益,为高压开关柜等电力设备的状态评价提供了一个新的思路和视角,是一个值得关注的研究方向。

参考文献

- [1] 杨波. 高压开关柜局部放电状态的监测及评估[J]. 电工技术, 2017(10): 1-2.
- [2] 张晓星, 周磊, 裘吟君. 针-板缺陷开关柜局部放电与空气分解组成的关系[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3948-3954.
- [3] 卓然, 关伟, 陈林聪. 气隙缺陷局部放电下空气分解组分特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 139-146.
- [4] 周梦迪. 12 kV 中压空气绝缘开关柜的局部放电监测与研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2018.
- [5] 唐传佳, 刘志存, 陈立新, 王克杰, 吴凡. 基于臭氧检测的高压开关柜初始放电预警技术[J]. 上海电气技术, 2018, 11(3): 50-52.
- [6] 李晓东, 薄拯, 严建华, 杜长明, 池涌, 岑可法. 相对湿度和氧气浓度对滑动弧放电特性影响研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(3): 537-539.
- [7] SUN Jizhong, STIRNER T, WANG Dezhen. A Kinetic Study of Ozone and Nitric Oxides in Dielectric Barrier Discharges for O₂/NO_x Mixtures[J]. Plasma Science and Technology, 2002, 4(2): 1227-1238.
- [8] WEI Linsheng, TAN Zhihong, HU Zhaoji, et al. Effect of Inert Gases on Ozone Generation Using Dielectric Barrier Discharge in Oxygen[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7): 1608-1612.

收稿日期: 2021-07-22