

环保气体绝缘环网柜气压指示与报警系统研究

傅杰 龚立俊 李光 郑小锋 宋建敏

信一电力设备有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：随着环保气体替代六氟化硫成为趋势，其较低绝缘强度使维持气箱压力稳定成为安全运行关键。构建高可靠、智能诊断的气压指示报警系统已上升为核心安全屏障。本文聚焦系统理论架构，阐述环保气体带来的监控挑战，提出以“精准感知、分级预警、状态诊断、协同联动”为核心的设计框架。文章依次论证了传感选型、多级阈值设定、基于趋势的状态评估、人机交互策略及与配电自动化平台的集成机制。旨在构建逻辑自洽的理论模型，为环保气体绝缘环网柜的安全运维提供坚实技术支持与方向指引。

【关键词】：环保气体；环网柜；气压监测；压力传感器；分级报警；状态诊断；智能运维

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.104

引言

在“双碳”战略驱动下，电力装备正加速绿色转型。环网柜作为配电网关键节点，其绝缘介质选择至关重要。六氟化硫虽性能优异，但因高全球变暖潜能值面临严格限制，采用环保气体已成必然趋势。然而，环保气体绝缘强度仅为六氟化硫的1/3至1/2，需通过提高气压或优化电场补偿，因此维持气箱压力长期稳定成为保障绝缘裕度的核心手段。

一旦因密封失效或老化导致泄漏，环保气体设备的绝缘性能将迅速衰减，极易在未被察觉下诱发击穿事故。传统机械式压力表精度低、无远程传输及预警功能，且易受振动干扰，已无法满足智能电网对设备状态全面感知与主动防御的需求。因此，开发集实时监测、智能分析、分级告警与信息交互于一体的气压指示报警系统，不仅是技术升级所需，更是保障新型环保设备安全运行的刚性需求。本文将摒弃具体硬件参数与实验数据依赖，转而从系统工程与控制逻辑层面，深入探讨该系统的核心构成、运行机理及其在智能配电网中的关键角色。

1 环保气体特性对气压监控系统的核心要求

构建环保气体绝缘环网柜气压监控系统，需先了解服务介质物理与电气特性，以此确定设计基准。主流环保气体（如干燥空气或氮气）与六氟化硫相比，分子结构简单、电子吸附能力差，均匀电场下击穿场强低。工程上通常采用两种策略弥补：一是优化内部导体与屏蔽结构使电场分布更均匀；二是适当提高工作气压，利用气体密度增加提升碰撞电离阈值，增强绝缘强度。

1.1 高精度与高灵敏度的测量基准

这一策略决定了气压监控系统核心使命，它不仅要记录物理量，更要守护设备绝缘生命线。系统首要要求是高精度与高稳定性，传感器需在设备数十年服役期内，抵抗环境应力影响，长期保持测量基准稳定，避免误报或漏报。其次，系统需高灵敏度，因环保气体绝缘强度对压力变化更敏感，安全窗口更窄，监控系统要能检测微小压力变化趋势，在压力降至危险阈值前

预警。

1.2 自主运行与本质安全的逻辑边界

环保气体绝缘环网柜常部署于无人值守环境，系统要实现全天候、免维护自主运行。这要求硬件可靠性高，软件逻辑有自诊断能力，能区分传感器故障、通信中断等异常与真实气体泄漏事件。最后，系统设计要遵循本质安全原则，严格控制气箱内部或附近电子元件功耗与发热量，避免成为点火源或造成热干扰。这些要求构成气压指示与报警系统设计的逻辑起点与性能边界。

2 气压感知单元的原理选择与可靠性保障

气压感知单元是整个系统的数据源头，其性能直接决定了后续所有分析与决策的准确性。在众多压力传感技术中，针对环保气体绝缘环网柜的应用场景，应优先考虑那些具备高精度、低功耗、长寿命及良好环境适应性的技术路线。压阻式传感器因其成熟的工艺、较高的灵敏度和相对低廉的成本，成为一种可行的选择。其核心是利用单晶硅材料的压阻效应，将压力引起的微小形变转化为电阻变化，进而通过惠斯通电桥电路输出与压力成比例的电压信号。然而，硅基传感器对温度变化较为敏感，必须配备完善的温度补偿算法，以消除环境温度波动对测量结果的干扰。

2.1 传感原理的适应性选型

另一种更具前景的技术是光纤光栅压力传感器。其工作原理是将压力变化转化为光纤布拉格光栅中心波长的偏移，通过解调波长变化即可获知压力值。该技术的最大优势在于其完全无源、本质安全，不受电磁干扰影响，且信号传输距离远、稳定性极高，非常适合于强电磁环境下的长期监测。尽管其成本相对较高，但对于追求极致可靠性的关键电力设备而言，其长期免维护的特性所带来的综合效益是显著的。无论采用何种传感原理，感知单元的封装与安装方式都至关重要。传感器必须通过可靠的金属密封接口与气箱内部连通，该接口本身不能成为新的泄漏点。同时，其感应膜片或探头应直接暴露于气箱内

部气体环境中，避免通过毛细管等间接方式引入测量滞后或堵塞风险。

2.2 内置自检与冗余配置的可靠性策略

为保障感知单元的可靠性，系统应内置自检机制。例如，可通过周期性地向传感器施加一个微小的激励信号，检测其响应是否在预期范围内，以此判断传感器是否处于正常工作状态。此外，采用双冗余传感器配置也是一种有效的可靠性提升策略。两个独立的传感器同时监测同一气室压力，系统通过比较两者的读数一致性来判断是否存在单点故障。当读数差异超过预设容差时，系统可发出“传感器故障”告警，提示运维人员进行检查，而非误判为气体泄漏，从而极大地提高了系统的鲁棒性与可信度。

3 分级报警逻辑的构建与阈值设定依据

一个有效的报警系统绝非简单的“超限即报”，而应是一个能够反映故障发展进程、指导差异化运维响应的智能决策前端。为此，必须构建一套科学、合理的分级报警逻辑。该逻辑通常可分为三个层级：预警、告警与严重告警。

3.1 基于趋势分析的早期预警机制

第一级为预警。其阈值应设定在设备额定工作压力的下限之上，留有充足的安全裕度。触发此级别的条件并非压力绝对值的越限，而是压力呈现出持续、稳定的下降趋势。系统通过内置的趋势分析算法，对一段时间内的压力数据进行斜率计算或移动平均处理，一旦判定下降速率超过正常波动范围，即发出预警信号。此级别的目的在于提示运维人员关注该设备，安排计划性巡检，核实是否存在早期微泄漏，从而将故障消灭在萌芽状态。

3.2 临界绝缘状态的告警与联动策略

第二级为告警。其阈值对应于设备能够维持基本绝缘性能的最低压力限值。当实测压力降至该阈值时，意味着设备的绝缘裕度已被压缩至临界水平，虽尚能短时运行，但已不具备承受操作过电压或雷电冲击的能力。此时，系统应发出明确的告警信号，并通过远程通信通道将信息推送至监控中心。运维策略应从“关注”升级为“限期处理”，要求在下一个计划停电窗口期内完成补气或检修。第三级为严重告警。其阈值设定在告警阈值之下，代表设备已处于极度危险的运行状态，随时可能发生绝缘击穿。一旦触发此级别，系统除发出最高级别的声光报警外，还应具备与环网柜自身保护控制单元联动的能力，例如，闭锁开关的电动操作，防止在绝缘薄弱状态下进行分合闸操作而引发事故。同时，应立即通知运维人员进行紧急处置。

3.3 多维约束下的阈值设定原则

各级阈值的设定，必须综合考虑环保气体的巴申曲线特性、设备内部电场的均匀系数、制造公差以及预期的运行环

境温度范围，确保在最严酷的组合条件下，设备仍能保有必要的安全边际。

4 基于压力动态特征的状态诊断方法

超越静态阈值的简单比较，对压力信号的动态特征进行深度挖掘与建模，是提升系统智能化水平与诊断精度的关键。气体泄漏过程通常遵循特定的物理规律，其压力随时间的变化曲线中，蕴含着丰富的、能够表征系统健康状况的故障信息。一个理想的、完全密封的气箱，其内部压力主要受环境温度变化影响，遵循理想气体状态方程，因此会呈现出与环境温度同步的、规律性的周期性波动。而一旦系统发生泄漏，压力变化将不再仅由温度主导，而是会叠加一个与泄漏速率直接相关的、持续性的单调递减分量，这使得压力变化曲线偏离健康状态下的基准模式。

4.1 压力-温度基准模型的构建与偏差识别

智能化的气压监控系统应能自主或辅助构建一个精确描述“健康”状态下压力与温度动态关系的基准模型。该模型可以通过设备投运初期、确认无泄漏时的历史运行数据学习获得，也可以根据气箱容积、气体种类等已知物理参数进行理论推导建立。在日常运行监控中，系统持续采集实测的压力与温度数据，并将其与基准模型的预测值进行实时比对与分析。若发现实测压力值系统性地、持续性地低于模型预测值，且这种偏差无法由正常的测量误差或短期扰动所解释，则可高置信度地诊断为存在气体泄漏。这种方法的核心优势在于，能够有效滤除由正常环境温度变化引起的压力周期性波动，从而将关注点聚焦于异常的泄漏信号，大幅降低因环境因素导致的误报率。

4.2 泄漏形态分析与故障模式智能识别

更进一步，通过对观测到的压力下降曲线的具体形态进行深入分析，不仅可以确认泄漏的存在，还可以对泄漏的严重程度与可能性进行初步评估与分类。例如，一个快速、近似线性的压力下降过程，通常指示存在较大的泄漏孔径或破裂口，属于需要立即处置的突发性故障；而一个缓慢、渐进的非线性压力衰减过程，则更可能源于密封材料的老化、微小的焊缝缺陷或慢性渗漏，属于需要计划性维护的渐进性故障。系统可根据识别出的不同故障模式特征，自动调整报警级别，并推荐相应的处理策略，为现场运维人员的决策提供更具针对性与价值的参考信息。这种从基础的“状态感知”进阶到“故障模式识别”的能力跃升，标志着气压监控系统从被动响应告警向主动诊断与预测性维护的深刻转变。

5 人机交互与信息协同机制设计

气压指示与报警系统的最终价值，体现在其信息能否被高效、准确地传递给决策者并融入更大的运维体系。因此，其人机交互与信息协同机制的设计至关重要。在本地层面，系统应

配备清晰、直观的可视化界面。除了实时显示当前压力值外，还应以图形化方式展示压力的历史变化趋势、与温度的关联曲线以及当前所处的报警状态。对于不同级别的报警，应采用差异化的声光提示，确保现场人员能够迅速识别事件的紧急程度。

5.1 本地可视化呈现与差异化警示

在本地层面，系统应配备清晰、直观的可视化界面。除了实时显示当前压力值外，还应以图形化方式展示压力的历史变化趋势、与温度的关联曲线以及当前所处的报警状态。对于不同级别的报警，应采用差异化的声光提示，确保现场人员能够迅速识别事件的紧急程度。这种直观的交互设计，使得运维人员在巡检现场无需依赖复杂的外部设备，即可第一时间掌握设备健康状态，为快速判断和处置提供直接依据。

5.2 远程语义化通信与双向协同管控

在远程层面，系统需有标准化通信接口，可无缝接入配电自动化系统或物联网管理平台。上报信息应为经系统处理后的结构化事件，如“[设备 ID]气压预警：检测到持续下降趋势”等，方便监控中心值班人员理解，提高应急响应效率。此外，

系统支持双向交互，运维人员可通过远程指令查询设备详细历史数据等操作。设备检修充气后，系统能接收“复位”指令，清除历史告警记录，重新学习压力-温度基准模型。通过信息协同，气压指示与报警系统成为智能配电网感知末梢有机组成部分，其数据流与控制流服务于电网安全、高效运行。

6 结论

本文从理论层面围绕环保气体绝缘环网柜气压指示与报警系统进行构建与推演。研究显示，因环保气体绝缘强度低，气压监控从常规监测功能变为核心安全技术。高性能系统要基于对环保气体物理特性的理解，选用高可靠性、高精度感知单元，构建多级、动态报警逻辑。其智能化核心是分析压力信号动态特征，实现泄漏故障早期识别与模式判别。通过人机交互与信息协同机制，将监测数据转化为运维决策支持，融入智能配电网管理体系。本研究未涉及硬件选型与量化测试，但勾勒出系统功能架构、运行机理与价值定位，其“精准感知、分级预警、状态诊断、协同联动”理念为产品研发与标准制定提供理论导向。未来研究可在此框架下，探索人工智能算法在压力趋势预测与故障模式识别中的应用，研究多源信息融合下的综合状态评估模型，推动环保型电力装备智能化与可靠性提升。

参考文献：

- [1] 高克利,颜湘莲,黄印,等.全氟异丁腈环保气体环网柜设计关键技术[J].高压电器,2024,60(9):104-113,134.
- [2] 陈术,李新阳,李猛,等.环网柜多参量智能在线监测系统设计[J].电气开关,2022,60(3):46-48,51.
- [3] 朱建富,魏信伍.开闭所 SF6 气压在线监测技术的研究与运用[J].浙江电力,2015(2):20-22,49.
- [4] 夏琨,刘宏玉,陈利民,等.12kV 环网柜气箱设计经济性研究[J].高压电器,2026,62(1):229-236.
- [5] 周蒙阳,刘龙光,李欣然,等.智能电网气体环网柜应用探讨[J].自动化应用,2025,66(12):133-134,138.