环保气体绝缘环网开关柜关键技术研究

朱晓壘, 周志东

(浙江高压开关厂有限公司, 浙江 绍兴 312300)

摘要 环保气体绝缘环网开关柜技术对于电力系统具有重要的应用价值, 本文阐述了现有的环网开关柜的绝缘方式以及其所存在的局限性, 分析了环保气体绝缘材料的技术演变过程和环保气体绝缘环网开关柜的关键技术, 研究了该技术在复杂工况下的运行特性、维护与故障诊断方法, 并结合工程案例探讨了其推广应用的前景。研究表明, 环保气体绝缘环网开关柜具有较高的可靠性和环境适应性, 未来发展需要优化材料性能并提高工程应用的经济性。

关键词 环保气体绝缘环网开关柜; 电场优化; 泄漏防护

中图分类号: TM591

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.16.002

0 引言

环网开关柜作为电力配电网中的重要设备, 它的绝缘性能直接对供电系统的安全以及稳定产生影响。传统的空气绝缘和固体绝缘方式在紧凑型设备中存在局限性, 六氟化硫气体虽然有优良的绝缘以及灭弧特性, 但是它高温分解之后产生的产物腐蚀性较强, 还会给环境带来严重的影响。近年来, 环保气体绝缘技术取得了较大的进步, 新型混合气体以及优化结构设计切实提高了设备的绝缘性能与可靠性, 然而环保气体的击穿特性、电场优化、密封封装以及长期运行稳定性仍然是工程应用面临的挑战^[1]。本文依据现有的环网开关柜的绝缘方式, 分析环保气体的技术发展变化, 借助对环保气体绝缘环网开关柜的关键技术以及工程实践的研究, 优化环保气体绝缘环网开关柜的性能, 推动其在配电网中的广泛应用。

1 现有环网开关柜的绝缘方式及其局限性

环网开关柜的绝缘方式主要有空气绝缘、固体绝缘以及气体绝缘等几种类型, 其中空气绝缘依靠充足的相间距离抑制电弧以及击穿现象, 鉴于设备内部空间有限, 空气绝缘的电气性能较难得到提升。固体绝缘一般采用环氧树脂、交联聚乙烯等材料, 提高电气性能并减小设备体积, 然而在长期运行过程中, 固体绝缘可能由于热胀冷缩、湿度影响或者材料老化而出现裂纹, 引发局部放电甚至导致绝缘失效。气体绝缘方式当前广泛应用于高压和超高压设备, 六氟化硫气体凭借出色的绝缘强度和灭弧特性成为主流选择, 不过因其对环境存在不良影响以及潜在的泄漏风险, 未来发展受到一定程度的制约。在环保要求变得日益严

格的背景下, 新型环保气体绝缘技术的研究十分关键, 需要全面考量电场分布、封装可靠性以及长期运行维护面临的挑战, 满足环网开关柜在复杂环境中的应用需求。

2 环保气体绝缘材料的技术演进

气体绝缘材料的发展历程呈现出从常规气体至复合环保气体的技术演变态势, 面向不同的应用需求, 需要持续对绝缘性能以及环境友好性进行优化。传统的六氟化硫气体依靠其出色的电绝缘性能与灭弧特性, 在高压设备领域得到广泛应用, 然而其高温分解产物有腐蚀性, 还会对环境产生严重影响, 故而针对替代气体的研究成为行业所关注的要点。低温等离子体处理技术的运用提高了环保气体的绝缘能力, 使其在高电场环境中可维持稳定的电气特性。混合气体方案借助组合不同成分的气体, 实现较高的击穿强度以及较低的温室效应, 其中氟腈类气体与二氧化碳、氮气的混合方案在工程实践中表现出良好的适应性。材料界面的优化是提升环保气体绝缘性能的重要方向, 借助纳米涂层技术以及气体分子结构调整, 可以减少电荷积聚, 提高整体耐压能力。另外, 气体的密封性和稳定性直接关乎长期运行效果, 新型密封材料的应用在提高气体保持率的同时, 也提高了环网开关柜的整体安全性。随着环保法规变得日益严格以及电力设备技术的进步, 未来环保气体绝缘材料的研究将朝着高效、稳定、低碳的方向发展, 并在实际工程应用中不断进行优化^[2]。

3 环保气体绝缘环网开关柜的关键技术

环保气体绝缘环网开关柜的技术发展包含多个环节, 如击穿特性调控、电场分布优化、封装泄漏防护

以及复合绝缘结构设计等。环保气体的击穿特性对设备的耐压能力起着决定性作用，要依靠气体配比优化以及电场控制来实现可靠的绝缘性能。电场分布的优化会影响设备内部的电应力情况，合理的电场均匀化设计有利于提高整体绝缘强度。封装结构的密封性关乎环保气体的长期稳定运行，需运用高效密封材料以及泄漏检测技术来保障设备安全。复合绝缘结构融合固体材料与气体介质的优点，在提高耐压水平的同时，也提高了设备的环境适应能力。

3.1 环保气体的击穿特性控制

在高电场环境中，环保气体的击穿行为会受到多种因素的作用，其中涉及气体种类、压力、温度以及电极结构等方面。气体的分子结构对其极化率以及电子俘获能力起着决定性作用，会直接对耐压水平产生影响，恰当的气体配比使整体击穿强度得到提升，常见的做法有掺杂低电负性气体降低自由电子密度，或者引入高电负性组分提高电子俘获效应。压力控制也可以影响击穿特性，增加气体压力能提高分子碰撞频率，让带电粒子更易于被中和，提升耐压性能，不过过高的气体压力可能会增加泄漏风险，还会对设备结构提出更高的强度要求，需要在耐压能力与工程可行性之间探寻平衡。电极结构的优化可抑制局部电场提高现象，运用圆角设计或者屏蔽电极技术降低局部场强峰值，减少局部放电风险。气体的温度稳定性也会对击穿特性造成影响，温度升高可能会使分子密度降低，使耐压水平下降，需结合热管理措施提升整体性能。

3.2 环网开关柜的电场分布优化

开关柜内部电场分布状况直接决定绝缘介质承受能力，若局部电场过高可能引发局部放电，使绝缘失效。影响电场分布的因素包括电极形状、导体排布方式以及接地设计，合理电极轮廓可以减少电场畸变，采用球形电极或者圆角电极能降低局部场强，防止出现尖端放电现象。导体之间间距的优化可以有效改进电应力分布，适当增加导体间隙或者采用屏蔽层设计可以降低场强梯度，提升绝缘稳定性。接地系统合理布局也是优化电场分布的重要因素，均匀接地网设计能防止局部区域电势突变，减少潜在电场畸变区域。电场

优化过程需结合有限元仿真分析，借助计算不同工况下电场强度分布，评估优化方案有效性，还要结合实验测试进行验证^[3]。

3.3 环保气体的封装与泄漏防护

气体封装技术的可靠性会对环保气体绝缘环网开关柜的长期运行稳定性产生影响。在进行密封结构设计时，要将材料兼容性、环境适应性以及维护便捷性纳入考量范围。封装材料的选择对于密封性能起着决定性作用，常见的密封材料有高分子橡胶、氟硅材料以及金属焊接密封技术，材料的耐老化性与耐化学腐蚀性直接决定了其长期稳定性。对封装结构进行优化可以减少气体泄漏的途径，采用双层密封结构或者冗余密封技术能够提升密封可靠性，并且降低长期运行过程中的泄漏风险。气体泄漏检测技术属于封装防护体系的重要组成部分，如表 1 所示，常见的检测方法包括光学探测、超声波检测以及气体传感器监测，每种方法都拥有不同的灵敏度以及适用环境。泄漏防护措施需要与气体补充系统相结合，借助实时监测气体浓度的变化，及时采取补充或者封堵措施，保证设备可长期稳定运行。

3.4 复合绝缘结构与材料选型

绝缘性能的提升依靠合理的复合结构设计实现，固体介质与气体介质相结合，不仅可以提升绝缘强度，还能够维持较高的机械强度。介质界面的优化能提高整体电场均匀性，借助纳米填料改性技术不仅能够提升固体介质的耐压能力，还可以提高与气体介质的结合效果。复合结构的可靠性评估要结合电气性能测试和环境适应性试验，经长时间的耐压实验以及老化试验，验证材料的长期稳定性，保证设备在不同工况下可保持可靠的绝缘性能^[4]。

4 环保气体绝缘环网开关柜的工程实践

环保气体绝缘环网开关柜在实际应用过程中会涉及多种运行工况，不同的环境条件对该设备的性能提出各异的要求。对其运行特性展开分析，可看出设备在复杂电力系统中的具体表现，而运行维护以及故障诊断技术则决定着设备的可靠性与寿命。针对不同气

表 1 环保气体泄漏检测方法对比

检测方法	检测原理	适用范围	灵敏度	维护要求
光学探测	通过光谱吸收检测气体泄漏	适用于透明密封结构	高	需定期校准
超声波检测	通过气体流动产生的超声波信号识别泄漏	适用于高压设备	中等	维护要求较低
气体传感器	采用化学传感器感应气体浓度变化	适用于多种环境	最高	需定期更换传感器

候条件开展适应性研究,有利于优化设备结构,促使其可在高温、高湿、高海拔等环境状况下稳定运行。

4.1 典型工况下环保气体绝缘环网开关柜的运行特性分析

在电力系统运行阶段,环网开关柜需要在不同工况中维持稳定的电气性能。气体绝缘特性发生变化会直接对设备的耐压能力以及可靠性造成影响,不同的环境条件会使绝缘气体的物理参数产生变化,比如温度上升有可能使气体密度下降,对介电强度产生影响。负荷条件出现波动会对设备的温升特性造成影响,在高负荷运行状态时,柜体内部的温度升高可能会加快材料老化,对长期稳定性产生影响。短时过电压冲击给环保气体的击穿特性带来挑战,合理的过电压防护措施可以降低电气应力,提升设备的耐久性^[5]。运行特性的测试数据可借助实验分析得出,如表2所示,典型运行工况下的主要技术指标可为设备优化提供参考。

表2 典型工况下环保气体绝缘环网开关柜的技术指标

运行工况	气体压力 (MPa)	介电强度 (kV/cm)	设备温升 (°C)	过电压耐受 能力(kV)
标准环境	0.6	45	15	130
高温环境	0.6	40	30	120
低温环境	0.6	48	10	135
高负荷 运行	0.6	43	40	125

4.2 环保气体绝缘环网开关柜的运行维护与故障诊断

设备运行维护情况对电网安全有着直接影响,定期开展气体绝缘状态检查,能避免因绝缘劣化引发电气故障。典型故障模式有气体泄漏、局部放电以及机械部件老化,泄漏检测采用光学或超声波方式,局部放电检测借助超高频传感器监测,机械部件老化借助结合振动监测与开关操作特性分析判断。应用故障诊断技术可以提高设备运维效率,减少非计划停电情况,提高供电可靠性。

4.3 环保气体绝缘环网开关柜在复杂环境下的适应性研究

电力设备所处的运行环境较为复杂,在高海拔地区,低气压的情况有可能对环保气体的介电性能产生影响,而依靠优化气体的成分配比则可以提升绝缘强度。在高湿度环境中,设备的表面绝缘特性存在下降的可能性,运用防潮涂层能够减少凝露对设备运行所造成的影响。极端温度环境给密封结构带来挑战,密

封材料需有良好的耐温性,在高温状况下保持稳定,在低温状况下不会发生脆化。盐雾、高污染等环境可能使外绝缘表面出现污染积聚,优化外绝缘结构并结合自清洁涂层技术可以降低污染对绝缘性能的影响。针对不同环境适应性展开研究能够指导设备结构设计,提高设备在多种运行条件下的稳定性。

4.4 环保气体绝缘环网开关柜的工程示范与推广应用

技术的工程示范为大规模应用提供了经验,国内国外多个工程示范项目证实了环保气体绝缘环网开关柜具有可靠性。智能配电网开展建设需要高可靠性的设备支撑,环保气体的运用能够降低温室气体排放,符合绿色电网的发展趋向。在工程推广过程中,经济性以及技术可行性是影响应用范围的关键因素,优化制造成本、提高维护便捷程度能提升市场竞争力。标准化设计可以加快推广速率,不同电网公司需要依据标准化方案进行选型与部署,借助示范项目的总结,优化设备的适应性,促使环保气体绝缘技术在电力行业得以广泛应用。

5 结束语

环保气体绝缘环网开关柜技术是在传统六氟化硫气体绝缘的基础上进行优化而来的,具有更为出色的环境适应性以及电气性能。通过气体击穿特性控制、电场分布优化、封装密封防护以及复合绝缘结构设计等手段,此项技术切实提高了环网开关柜的绝缘水平,同时降低了对环境的影响。工程应用显示,环保气体绝缘环网开关柜在不同运行环境下都表现出较高的可靠性与稳定性,适用于复杂电网的应用场景。

参考文献:

- [1] 张丽强.两种布置方式的12kV环保型气体绝缘环网柜设计[J].电气技术,2021,22(12):105-108.
- [2] 杜仲江.新型环保气体绝缘环网柜的设计[J].上海电气技术,2024,17(01):73-75,24.
- [3] 胡全丹,赵树生,顾晓贺,李钊.12kV环保气体绝缘环网柜电场分析及优化设计[J].机械设计与制造工程,2024,53(03):25-28.
- [4] 王其中,李俊豪.12kV气体绝缘环网柜工频特性研究及优化[J].电工电气,2023(04):66-70.
- [5] 海龙.环网开关柜绝缘气体环保化探究[J].化工管理,2021(03):137-138.