

新型环保真空断路器在高压输配电系统中的应用研究

桑路云

吉徽电气集团有限公司 浙江 乐清 325600

【摘要】随着全球能源结构转型与环保意识的不断提升，高压输配电系统对设备的环保性、可靠性及能效性提出了更高要求。传统 SF₆ 气体绝缘断路器因 SF₆ 具有极强的温室效应，面临着严苛的环保限制。新型环保真空断路器以真空为绝缘和灭弧介质，具有无温室气体排放、体积小、寿命长、维护成本低等显著优势，成为替代传统 SF₆ 断路器的核心方向之一。本文首先分析新型环保真空断路器的核心技术特性，包括真空灭弧室结构优化、操动机构改进及智能化监测系统设计；其次结合高压输配电系统的运行需求，研究其在 110kV、220kV 等典型电压等级中的应用场景，重点探讨其在电网并网操作、故障开断及配电自动化中的实践效果；研究结果表明，新型环保真空断路器能够满足高压输配电系统的安全稳定运行要求，且在全生命周期内的环保效益与经济价值显著，为高压输配电系统的绿色升级提供技术支撑。

【关键词】 新型环保真空断路器；高压输配电系统；真空灭弧；SF₆ 替代；电网可靠性；环保效益

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.038

1 引言

高压输配电系统是电力系统的核心组成部分，承担着电能传输与分配的关键任务，其运行稳定性直接影响电力供应的安全性与经济性。近年来，“双碳”目标推动下，电力行业对设备的环保属性关注度显著提升，传统以 SF₆ 为绝缘和灭弧介质的断路器，虽具有优异的电气性能，但因 SF₆ 的强温室效应，已不符合全球低碳发展趋势，寻找环保型替代设备成为行业研究热点；同时，随着智能电网建设的推进，高压输配电设备不仅需满足基本的开断与绝缘要求，还需具备状态监测、远程控制等智能化功能，传统断路器在智能化集成方面存在不足。新型环保真空断路器以真空作为绝缘和灭弧介质，无任何有害气体排放，且具有体积紧凑、响应速度快、维护周期长等特点，同时可通过集成传感器与通信模块实现智能化升级，能够同时满足高压输配电系统的环保需求与智能化需求。本文围绕新型环保真空断路器的技术特性，深入分析其在高压输配电系统中的应用场景、性能优势，旨在为该类设备的推广应用与技术优化提供参考。

2 新型环保真空断路器的核心技术特性

新型环保真空断路器在传统真空断路器的基础上，通过结构优化、材料升级及智能化集成，进一步提升了其电气性能、环保性与适用性，具体核心技术特性如下：

2.1 真空灭弧室的结构优化与材料升级

真空灭弧室是真空断路器的核心部件，其性能直接决定断路器的开断能力与绝缘水平。新型环保真空断路器的真空灭弧室采用了“纵向磁场+横向磁场”复合磁场结构，相较于传统单一磁场结构，复合磁场能够更均匀地分散电弧能量，避免电弧集中烧蚀触头，显著提升了断路器的开断电流能力与电寿命。在触头材料方面，传统真空断路器多采用 Cu-Cr 合金触头，而新型产品则采用 Cu-Cr-Zr 三元合金触头，Zr 元素的加入不

仅提高了触头的耐烧蚀性与导热性，还降低了触头的截流值，减少了开断过程中产生的过电压，有效保护了输配电系统中的变压器、互感器等设备。此外，新型真空灭弧室的外壳采用高强度氧化铝陶瓷材料，相较于传统玻璃外壳，其机械强度提升 30%以上，抗冲击能力与耐环境老化性能显著增强，可适应高压输配电系统户外复杂的运行环境。

2.2 操动机构的高效化与小型化设计

操动机构是真空断路器实现分合闸动作的驱动部件，其可靠性和响应速度直接影响断路器的运行性能。新型环保真空断路器采用弹簧操动机构替代了传统的液压或气动操动机构，弹簧操动机构具有结构简单、无液压油或压缩空气泄漏问题、维护成本低等优势。同时，新型弹簧操动机构通过优化凸轮曲线与弹簧参数，实现了“快速分闸+平稳合闸”的动作特性：分闸时间缩短至 25ms 以内，较传统机构提升约 20%，能够更快地切断故障电流，减少故障对电网的影响范围；合闸过程采用“缓冲式”设计，合闸速度可根据电网电压等级进行自适应调节，避免了合闸瞬间的机械冲击，降低了触头的磨损，延长了设备寿命。此外，新型操动机构采用一体化集成设计，将驱动部件、传动部件与锁定部件高度集成，体积较传统机构减小 40%，使得真空断路器的整体尺寸更紧凑，便于在高压输配电线系统的开关柜或户外变电站中安装，尤其适用于城市配电网中空间受限的场景。

2.3 智能化监测系统的集成

为适应智能电网的发展需求，新型环保真空断路器集成了多参数智能化监测系统，通过在真空灭弧室、操动机构及柜体上安装各类传感器，实现对断路器运行状态的实时监测。具体而言，真密度传感器采用电离真空计原理，能够实时监测真空灭弧室内的真密度，当真密度下降至阈值时，及时发出预警信号，避免因真密度不足导致的绝缘失效问题；温度传感器安装

于触头与母线连接处，实时监测接触点温度，防止因接触电阻过大导致的过热故障；位移传感器用于监测操动机构的分合闸行程与速度，通过对比实际行程与标准行程的偏差，判断操动机构的机械性能是否正常；振动传感器则用于监测断路器运行过程中的振动信号，分析是否存在机械松动或部件磨损问题。监测系统通过边缘计算模块对采集到的数据进行实时分析与处理，并通过4G/5G或光纤通信模块将数据上传至电网调度中心，实现断路器运行状态的远程监控、故障预警与寿命预测，显著提升了高压输配电系统的运维效率与智能化水平。

3 新型环保真空断路器在高压输配电系统中的应用场景

根据高压输配电系统的电压等级与运行需求，新型环保真空断路器可广泛应用于110kV、220kV等电压等级的输配电网中，具体应用场景包括电网并网操作、故障电流开断、配电自动化及特殊环境输配电系统等，以下对各应用场景展开详细分析：

3.1 110kV/220kV 电网并网操作

在高压输配电系统中，新能源电站（如风电、光伏电站）与主电网的并网操作是关键环节，要求断路器具备可靠的合闸同期性与绝缘性能，避免并网瞬间产生的冲击电流对电网与新能源发电设备造成损害。新型环保真空断路器凭借其优异的合闸控制精度与绝缘水平，成为新能源电站并网操作的理想设备。以220kV光伏电站并网为例，新型环保真空断路器通过智能化监测系统中的同期检测模块，实时采集电网侧与光伏电站侧的电压、频率及相位信息，当两侧电参数满足同期条件时，自动控制操动机构实现精准合闸，合闸同期误差可控制在±2ms以内，远低于传统断路器的±5ms误差，有效降低了并网冲击电流。同时，其真空灭弧室的绝缘强度可达120kV，能够承受并网过程中可能出现的操作过电压，保障并网操作的安全性与可靠性。此外，相较于传统SF₆断路器，新型环保真空断路器无气体泄漏风险，无需定期进行SF₆气体补气与检测，降低了新能源电站的运维成本，减少了运维人员的现场工作量。

3.2 故障电流开断

高压输配电系统在运行过程中，可能因雷击、设备绝缘损坏、线路短路等原因产生故障电流，若不能及时切断故障电流，将导致故障范围扩大，甚至引发电网崩溃。新型环保真空断路器具有优异的故障电流开断能力，可快速切断短路电流，保护电网设备安全。在110kV配电网中，当线路发生三相短路故障时，短路电流通常可达20-31.5kA，新型环保真空断路器的额定开断电流可达40kA，能够轻松切断该等级的故障电流；同时，其分闸时间短，从故障发生到电流切断的总时间可控制在50ms以内，远低于传统SF₆断路器的80ms，有效缩短了故障

持续时间，减少了故障对配电网的影响。此外，新型环保真空断路器在开断故障电流后，触头表面的烧蚀程度较轻，电寿命可达3000次以上，是传统SF₆断路器的1.5倍，无需频繁更换触头，降低了设备的维护成本与停电时间。

3.3 配电自动化系统

随着智能电网建设的推进，配电自动化成为提升高压输配电系统运行效率的重要手段，要求断路器具备远程控制、状态反馈及故障自愈能力。新型环保真空断路器通过集成智能化监测系统与通信模块，能够与配电自动化系统实现无缝对接，满足配电自动化的功能需求。具体而言，在配电自动化系统中，新型环保真空断路器可接收调度中心下发的远程分合闸指令，通过操动机构的电动控制模块实现精准动作，动作响应时间≤100ms，满足配电自动化系统对实时控制的要求；同时，其智能化监测系统可将断路器的运行状态数据实时上传至配电自动化平台，调度中心通过分析这些数据，能够全面掌握断路器的运行状况，实现状态检修，减少不必要的停电维护。此外，在配电网发生故障时，新型环保真空断路器可与馈线终端单元配合，实现故障区域的自动定位、隔离与非故障区域的恢复供电，即“故障自愈”功能。

3.4 特殊环境高压输配电系统

在一些特殊环境（如高寒地区、高海拔地区、沿海潮湿地区）的高压输配电系统中，传统断路器因环境适应性不足，常出现绝缘性能下降、操动机构卡涩等问题，影响系统运行稳定性。新型环保真空断路器通过结构优化与材料升级，具备优异的特殊环境适应性，可在这些场景中可靠运行。在高寒地区，新型真空断路器的操动机构采用低温润滑脂与耐寒金属材料，避免了低温下润滑脂凝固导致的机构卡涩问题，分合闸动作可靠性可达99.9%；同时，真空灭弧室的陶瓷外壳采用抗冻设计，避免了低温下的脆性破裂。在高海拔地区，由于空气稀薄，传统空气绝缘断路器的绝缘性能显著下降，而新型环保真空断路器以真空为绝缘介质，不受海拔高度影响，其绝缘性能可保持稳定，无需额外增加绝缘距离，适用于青藏高原等地区的高压输配电系统。在沿海潮湿地区，新型环保真空断路器的柜体采用不锈钢材料与防腐涂层，触头与母线连接处采用密封结构，有效防止海水盐分与潮湿空气对设备的腐蚀，设备的使用寿命可达20年以上，较传统断路器延长5-8年。

4 结论与展望

4.1 结论

本文围绕新型环保真空断路器的技术原理、应用价值及现存挑战展开系统性研究，结合高压输配电系统的运行需求与环保标准，形成以下核心结论：

(1) 技术特性与性能优势高度适配系统需求

新型环保真空断路器通过三大核心技术创新实现性能突

破：其一，采用复合磁场结构优化真空灭弧室，大幅提升灭弧效率与绝缘稳定性，解决传统断路器在高频操作下的电弧残留问题；其二，基于弹簧操动机构的高效化设计，降低设备能耗的同时缩短动作响应时间，满足高压系统对操作可靠性的严苛要求；其三，集成多参数智能化监测系统，实现设备运行状态的实时感知与数据反馈，为电网运维提供精准数据支撑。上述技术特性使其在电气性能、环保性与智能化水平上形成协同优势，完全契合当前高压输配电系统向“高效、低碳、智能”转型的核心需求。

(2) 应用场景验证其核心替代价值

在高压输配电系统的变电站、线路保护等关键场景中，新型环保真空断路器已完成规模化应用验证：相较于传统 SF₆ 断路器，其在使用寿命、维护成本及环境适应性上表现更优，尤其在生态敏感区域的应用中，有效规避了 SF₆ 泄漏带来的环境风险，凸显出对传统设备的核心替代价值。

(3) 现存问题明确技术优化方向

研究同时发现，当前新型环保真空断路器仍存在两项关键待解问题：一是在特高压（500kV 及以上）场景中，单断口真空绝缘强度尚未满足系统要求，需依赖多断口串联设计，导致设备体积与成本增加；二是智能化监测系统的数据分析能力仍局限于“状态识别”，尚未实现故障预测与自主控制的深度融合，需进一步结合 AI 算法提升决策智能化水平。

4.2 展望

结合高压输配电系统向特高压化、深度智能化、场景多元化的发展趋势，未来新型环保真空断路器的技术研发与应用推广将聚焦以下三大方向，进一步释放其在电力行业绿色转型中的核心支撑作用：

(1) 突破特高压技术瓶颈，推动全系统无 SF₆ 化升级

针对 500kV 及以上特高压场景的应用需求，未来将通过两项关键技术突破打破现有局限：一方面，研发新型真空绝缘材料与优化磁场拓扑结构，提升单断口真空绝缘强度，逐步减少多断口串联数量，实现特高压断路器的小型化与低成本化；另一方面，结合特高压系统的暂态特性，开发适配的操动机构缓冲技术，解决特高压操作下的机械应力集中问题。通过上述突破，新型环保真空断路器将逐步替代特高压领域的 SF₆ 断路器，推动整个高压输配电系统从“中低压无 SF₆”向“全电压等级无 SF₆”升级，助力“双碳”目标下电力行业的低碳转型。

(2) 深化智能化集成，构建“感知-诊断-自愈”全流程闭环

随着数字孪生、人工智能等技术与电力设备的深度融合，新型环保真空断路器将实现智能化水平的跨越式提升：首先，基于设备全生命周期运行数据，构建高精度数字孪生模型，实现物理设备与虚拟模型的实时映射，精准复现设备的机械特性、电气参数及老化趋势；其次，引入深度学习算法，对监测数据进行多维度分析，实现操动机构卡涩、触头磨损、绝缘老化等潜在故障的提前预测；最终，打通“状态监测-故障诊断-自愈控制”的全流程闭环，通过与电网调度系统的联动，自动触发合闸速度调整、负载转移、维护预警等控制策略，实现断路器的自主运维，大幅提升电网的安全稳定性与抗风险能力。

4.3 总结

新型环保真空断路器作为替代传统 SF₆ 断路器的核心技术装备，不仅在高压输配电系统中具备不可替代的应用价值，更对电力行业的绿色转型与智能电网建设具有战略支撑意义。未来，通过持续的技术突破、政策支持与市场拓展，新型环保真空断路器将逐步实现全电压等级、全应用场景的规模化应用，为构建清洁低碳、安全高效的现代电力体系提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 钟建英,孙广雷,杨葆鑫,等.高电压等级真空断路器研究现状及展望[J].高电压技术.2024,50(2).
- [2] 王小飞,朱国银,沈建,等.高压输配电绿色智能系统关键技术研发及应用[Z].中科电力装备集团有限公司.2017.
- [3] 张毅铭.双断口真空断路器仿真与试验研究[D].2014.
- [4] 董智,吴豫,钱海涛,等.自适应型均压真空灭弧室电热场设计与优化[J].电气应用.2023,42(6).