

绿色电气设备技术特性、应用现状及推广建议

刘志刚 计伟

内蒙古电力集团蒙电经济技术研究院有限责任公司 内蒙古自治区 呼和浩特 010010

【摘要】：为响应“双碳”目标与电力行业绿色转型战略，破解传统电气设备高温温室气体排放、特殊环境适应性不足等痛点，本文基于实地调研、厂家技术对接及行业标准梳理，系统剖析 SF6/N2 混合气体 GIS、35kV SF6 充气柜及环氧树脂浇注干式电力变压器三种核心绿色电气设备的技术原理、核心特性、经济性指标、应用现状及标准支撑体系。结合内蒙古电网高寒、高海拔、多风沙的区域特点，针对性提出分场景推广、配套技术完善、国产化突破及标准落地的实施建议，为区域电网绿色装备升级、安全可靠运行及电力行业“双碳”转型提供理论支撑与实践参考。全文围绕设备全生命周期展开分析，兼顾环保效益与工程实用性，助力构建适配新型电力系统的绿色装备体系。

【关键词】：绿色电气设备；混合气体 GIS；SF6 充气柜；环氧树脂浇注干式变压器；全生命周期成本；内蒙古电网；双碳转型

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.050

1 引言

“碳达峰、碳中和”目标下，电力行业作为碳排放核心领域（占全国总排放量 40%以上），绿色转型至关重要。SF6 气体作为电力设备主流绝缘灭弧介质，全球变暖潜值（GWP）达 23900，大气寿命 3200 年，全球超 50% 的 SF6 用于电力工业，其温室效应已成为行业绿色发展的核心瓶颈。

内蒙古等北方地区兼具高寒、高海拔、多风沙等复杂环境特征，传统电气设备普遍存在绝缘衰减、运维成本高、安全风险突出等问题：纯 SF6 GIS 低温易液化绝缘失效，传统空气绝缘开关柜多风沙环境下易积污闪络，油浸式变压器存在漏油燃爆隐患。在此背景下，推广适配复杂场景、低环境影响的绿色电气设备，成为电网升级与能源转型的必然选择。

本文聚焦三种技术成熟的绿色设备，通过分析其技术特性、经济性与应用现状，结合内蒙古电网需求提出推广策略，为区域电网绿色化改造及同类区域装备升级提供借鉴，推动电力行业向低碳、安全、高效转型。

2 核心绿色电气设备技术特性及经济性分析

2.1 SF6/N2 混合气体 GIS

2.1.1 技术原理与发展背景

气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）是电网核心输变电设备，传统 GIS 依赖纯 SF6 介质的优异绝缘灭弧性能，但强温室效应与“双碳”目标相悖，SF6 替代技术成为研发热点。目前主流替代方案中，全氟异丁腈混合气体造价高、成熟度不足，空气绝缘优化技术难适配高压场景，而 SF6/N2 混合气体方案（体积比 3:7，工作压力从 0.45MPa 提升至 0.58MPa）凭借技术成熟、成本可控、兼容性强的优势，成为国内主流，已在 110~500kV 电压等级广泛应用。

2.1.2 核心技术特性

（1）环保性能显著提升。混合气体 GIS 采用“分段介质”

设计，仅断路器模块保留纯 SF6，其余模块用 30%SF6/70%N2 混合介质。以某 110kV 变电站 8 个间隔设备为例，传统纯 SF6 设备（不含断路器气室）SF6 填充量 70kg，寿命终期等效 CO2 排放量 164.5 万 kg；混合气体方案 SF6 填充量仅为传统设备 30%，等效排放量降至 58.02 万 kg，仅为纯 SF6 设备的 35%，且 N2 无温室效应、成本低廉，环保性价比突出。

（2）低温适配性强。纯 SF6 在 0.45MPa 压力下液化温度为 -35.1℃，无法适配内蒙古 -40℃ 以下极端低温；而 0.58MPa 压力下 30%SF6/70%N2 混合气体液化温度低于 -50℃，可完全适配高寒环境，无需额外加热装置，降低运维复杂度与能耗。

（3）绝缘性能稳定。试验表明，SF6/N2 混合气体对电场不均匀度敏感性更低，SF6 含量 10%~40% 区间时，工频与冲击击穿电压比值增幅显著，且对金属微粒耐受度更高，能有效降低设备制造安装残留金属微粒带来的绝缘风险，提升运行可靠性。

（4）在线监测存在短板。现有设备多仅监测混合气体密度，缺乏混合比、微水含量、分解产物的同步在线监测，混合比偏差超 1% 即影响绝缘强度，微水超标加速设备腐蚀，且多数检测依赖离线采样，耗时 2~3 天且易造成气体泄漏，难以满足全时段安全管控需求。

2.1.3 经济性分析（全生命周期视角）

以某 110kV 变电站 8 个间隔设备测算，混合气体 GIS 与纯 SF6 GIS 单价均约 45 万元/间隔，总投资 360 万元，无额外成本增量，因仅替换介质与调整压力参数，制造工艺与传统设备一致。

运维与碳排放方面优势显著：传统纯 SF6 GIS 年允许泄漏量 1%，年等效 CO2 排放量 16.45 吨；混合气体 GIS SF6 填充量 21kg，年允许泄漏量 0.5%，年等效排放量仅 150 吨，降幅 47.7%。30 年全生命周期内，混合气体方案可减少碳排放 27270 吨，且低温适配性强、故障发生率低，能进一步降低运维能耗

与检修成本。

2.2 35kV SF6 充气柜

2.2.1 技术原理与适用场景

35kV SF6 充气柜属于柜式气体绝缘金属封闭开关设备 (C-GIS)，将中压元件集成密闭于不锈钢气箱，以 SF6/N2 混合气体为绝缘介质，实现全绝缘、全密封、模块化运行。其兼具 GIS 高可靠性与开关柜灵活适配性，适用于城市核心区配网、高海拔区域、新能源基地等场景，可应对高湿、多风沙等恶劣环境，是中压电网绿色智能化升级的核心装备。

2.2.2 核心技术特性

(1) 环境适应性极强。气箱采用 304 不锈钢激光焊接制造，经双重检漏后年漏气率 $\leq 0.01\%$ ，防护等级达 IP67，可隔绝尘埃、污秽等干扰，规避安全风险。设备可承受 $-25^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ 温度范围，抗震烈度 8 级，适配海拔 1000m 以上区域，完全满足内蒙古复杂环境需求。

(2) 结构紧凑省空间。传统 KYN61-40.5 型空气绝缘开关柜体积庞大，而主流 XGN46-40.5 型 SF6 充气柜单柜占地面积减少 30%~40%。其采用标准化模块设计，支持多单元灵活组合，可快速适配不同接线方案，缩短施工周期与成本。

(3) 电气性能与安全性优异。SF6 介电强度为空气 2.5 倍，灭弧速度是空气 100 倍，设备额定短路开断电流 25~40kA，通过有限元仿真优化电场分布，零表压可短期应急运行。配备完善“五防”连锁与定向防爆膜片，标配温度补偿密度继电器，全方位保障运行安全。

(4) 低运维且适配智能运维。高压部件全封闭设计，无需定期清扫，断路器机械寿命 ≥ 20000 次，全生命周期维护成本较传统设备降低 50% 以上。支持 SF6 参数实时采集与远程告警，高端型号可实现多参数在线监测与一体化运维，适配无人值守需求。

2.2.3 经济性分析 (全生命周期视角)

SF6 充气柜初始投资为传统空气绝缘开关柜的 1.5~2 倍，某工业园区 10 面设备初始投资 240 万元，较传统设备增加 71.4%，溢价源于密封气箱、激光焊接等工艺。但 30 年全生命周期综合成本更具优势：占地节省 40%，减少土地与土建投资；年均运维成本仅为设备总价 1%，10 面设备 30 年可省运维成本 36 万元；故障发生率极低且维护无需大面积停电，减少停电损失，在高需求场景性价比显著。

2.3 环氧树脂浇注干式电力变压器

2.3.1 技术原理与发展现状

环氧树脂浇注干式变压器通过真空浇注工艺将绕组密封包裹，形成致密绝缘层，替代传统绝缘油，实现绝缘、散热与防护一体化。其核心部件采用优质冷轧硅钢片与铜/铝导体，经

真空脱气、恒温固化处理，绝缘层无气泡裂纹，电压等级覆盖 10~110kV，容量 6.3~63MVA，110kV 级大容量设备已进入试点应用，逐步替代油浸式变压器在城市核心区、新能源升压站等场景的应用。

2.3.2 核心技术特性

(1) 运行稳定性高。高压线圈采用分段圆筒式结构，配合玻璃纤维网格绝缘，优化散热气道，绝缘击穿场强达 18~22kV/mm，局放水平低于 5pC，抗短路能力突出，可承受多次短路冲击。绕组耐雷电冲击能力强，能有效抵御过电压损坏。

(2) 绿色安全且适配广。环氧树脂难燃阻燃、氧指数 $\geq 30\%$ ，无有毒气体排放，无油化设计杜绝漏油污染与燃爆隐患，防潮耐污秽，适用于城市核心区、数据中心等场景。F 级/H 级绝缘长期运行温度达 155 $^{\circ}\text{C}$ /180 $^{\circ}\text{C}$ ，相同容量下体积小、重量轻，适配空间受限场景。

(3) 低运维且智能。绕组全密封包裹，无需绝缘油检测与铁芯清扫，仅需定期检查冷却系统与接线端子，运维工作量远低于油浸式变压器。配备完善测控系统，支持参数实时监测与远程管控，适配无人值守场景。

2.3.3 经济性分析 (全生命周期视角)

110kV 级环氧树脂浇注干式变压器单价为同容量油浸式变压器的 5~6 倍，50MVA 设备单价约 1700 万元，远高于油浸式的 253~310 万元。但全生命周期优势明显：油浸式设备 30 年运维成本为总价 60%~90%，而该设备仅 15%~30%，50MVA 设备 30 年可省运维成本 200~300 万元；无污染物排放，无需环保处理成本，且故障发生率低，减少停电间接损失，在高环安全需求场景价值突出。

3 设备应用现状及标准支撑体系

3.1 应用现状

(1) SF6/N2 混合气体 GIS：技术成熟且规模化推广趋势明显，已纳入国网 2023 版通用设备目录，全国累计应用超千个间隔。内蒙古毫沁营 110kV 工程将其纳入设计，作为高寒试点。该设备可通过气体置换改造存量设备，改造成本为换新的 30%~40%，对电网供电影响小，适配存量电网升级需求。

(2) 35kV SF6 充气柜：连续列入多版国网通用设备目录，海拔 1000m 以上区域优先采用。国内主流厂家已实现规模化生产，广泛应用于城市配网、新能源基地等场景。在内蒙古高海拔区域试点应用，通过低温适配措施，解决传统设备运行难题。

(3) 环氧树脂浇注干式变压器：110kV 级设备已实现多项示范应用，新疆达坂城风电项目与天津东丽变电站示范工程均运行稳定，标志着大容量设备国产化突破，目前已拓展至城市核心区、数据中心等场景。

3.2 标准支撑体系

三种设备已形成多层次标准体系，覆盖全流程。SF₆/N₂混合气体 GIS 标准最完善，IEC 发布 4 项核心标准，我国有 7 项行业标准、11 项团体标准及 4 项国网企业标准，配套有应用指导手册。35kV SF₆ 充气柜有多项行业与团体标准，覆盖运维、检测等核心环节。环氧树脂浇注干式变压器有 T/CEEIA 622—2022 团体标准，明确 110kV 级设备要求，支撑国产化发展。

4 适用条件及内蒙古电网推广建议

4.1 适用条件梳理

(1) SF₆/N₂ 混合气体 GIS：适配 220kV 及以下新建变电站与存量设备环保改造，核心适配“环保+低温”场景，不适用于 500kV 以上高压场景及高监测精度需求场所。(2) 35kV SF₆ 充气柜：适配高海拔、多风沙、空间受限及高可靠性需求场景，不适用于初始投资敏感的一般性农网。(3) 环氧树脂浇注干式变压器：适配城市核心区、新能源升压站等场景，不适用于初始投资敏感、环境良好的普通变电站。

4.2 内蒙古电网推广建议

(1) 分场景试点推广。混合气体 GIS 优先在呼包二市新建变电站试点，总结存量设备改造经验后全区推广；35kV SF₆ 充气柜聚焦高海拔、多风沙区域，新建站优先选用；环氧树脂浇注干式变压器在城市核心区与新能源升压站试点，批量应用于新能源基地。

参考文献：

- [1] 国家电网有限公司设备管理部.SF₆/N₂ 混合气体 GIS 设备应用指导手册[M].北京:中国电力出版社,2023.ISBN:9787519865788.
- [2] IEC 60376:2018,电气设备用工业级六氟化硫(SF₆)及其混合物中使用的补充气体规范[S].
- [3] DL/T 1986-2019,六氟化硫混合气体绝缘设备气体检测技术规范[S].
- [4] T/CEEIA 622—2022,110 kV 级三相环氧树脂浇注绝缘干式电力变压器技术参数和要求[S].
- [5] DL/T 2228-2021,变电站用充气式开关柜运维检修规程[S].
- [6] 王锡凡,方万良,杜正春.电力系统低碳化转型关键技术及展望[J].中国电机工程学报,2021,41(1):1-18.
- [7] 刘振亚.智能电网技术[M].北京:中国电力出版社,2020.
- [8] 张粒子,李波,谢冰峰.SF₆ 替代气体在电力设备中的应用现状与发展趋势[J].电网技术,2022,46(5):1652-1663.
- [9] 陈维江,孙海顺,王绍武.高海拔地区电力设备绝缘特性及适配技术[J].中国电机工程学报,2020,40(12):3956-3966.
- [10] 李建林,惠东,张博.新能源发电并网用变压器技术发展趋势[J].电力系统自动化,2023,47(8):1-10.

(2) 完善配套技术。研发混合气体多参数在线监测设备，建立智能运维模式；优化充气柜密封与变压器保温结构，强化低温适配；开展专项培训，培养专业运维团队。

(3) 推动国产化降本。攻关高端环氧树脂材料国产化，将设备单价降至油浸式的 3~4 倍以内；支持本地企业研发适配部件，降低采购成本；鼓励核心技术专利转化，提升竞争力。

(4) 强化标准落地。全流程严格执行标准，建立质量追溯体系；编制区域应用手册，细化适配要求；加强标准宣贯与监督检查，保障设备可靠运行。

5 结论

三种绿色电气设备在各自领域实现环保与场景适配性突破，技术成熟且标准完善：混合气体 GIS 兼具环保与低温适配性，35kV SF₆ 充气柜环境适应性与低运维优势显著，环氧树脂浇注干式变压器无油化安全特性突出，可有效破解传统设备痛点。

结合内蒙古电网特点，通过分场景推广、配套技术完善、国产化突破及标准落地，可实现设备规模化应用，助力区域电网环保升级与安全运行。未来需攻克监测技术、材料国产化等短板，优化经济性，推动绿色设备广泛应用，构建适配新型电力系统的绿色装备体系，为电力行业“双碳”转型提供实践支撑。