

[开关设备]

智能低碳环保型高压开关设备的设计与优化

文/蒋志龙 欧阳道生
宁波天安智能电网科技股份有限公司

针对现有SF₆气体绝缘高压开关设备在运行过程中存在的不环保、难维护及智能化程度不高等问题,开展智能低碳环保型高压开关设备的设计与优化研究。通过环保介质替代、电场分布优化设计及智能监测与数据分析应用等措施,实现设备的低碳环保与智能化运维。实验结果表明,优化后的开关设备电场强度均匀度提升至91%,绝缘电阻稳定性提升33.3%,故障预测准确率达到96.2%,碳排放强度较传统设备平均降低41.2%,验证设计方案的可行性与先进性。

随着全球能源低碳转型与我国新型电力系统建设的深入推进,电力系统向着智能化、低碳化方向快速发展。高压开关设备作为输配电系统中的关键设备,其环境友好性能和智能化水平直接影响电网发展的持续性和电力系统运行效率及可靠性^[1]。现有高压开关设备普遍采用SF₆气体作为绝缘介质,该气体具有显著的温室效应,与当前全球环保减排趋势相悖。同时,传统开关设备结构体存在小型化的技术瓶颈,在电场、温度场及机械力学等方面存在优化提升的空间,操动机构的可靠性和安全性没有透明化监控与保障,智能化程度低,缺乏数字化在运维及全生命周期管理方面的应用,导致设备运行维护成本高,不适应新型电力系统的要求。

当前72.5 kV高压开关设备在新能源并网应用场景中的需求日益增长,对设备的环保性能、运行可靠性及智化水平提出更高要求。特别是在高温、高湿、高盐的恶劣环境下,传统设备的结构可靠性和环境适应性面临严峻挑战。为适应电网现代化发展需求,亟需开展新型智能低碳环保型高压开关设备的研究,重点解决电场结构优化、低碳环保化以及智能化监测等关键技术问题,推动高压开关设备向

智能化、低碳化方向转型。

高压开关设备现状

高压开关设备作为电力系统中的关键设备,在电能输送与控制过程中发挥着重要作用,而传统72.5 kV高压开关设备在智能化、低碳环保等方面存在显著不足。现有高压开关设备普遍采用SF₆气体作为绝缘介质,该气体具有显著的温室效应,会被逐步限制使用。针对SF₆气体的环境危害,采用清洁空气绝缘技术的新型环保型72.5 kV GIS已逐步应用于海上风力发电系统中,如图1所示。



图1 应用于风电系统的72.5 kV GIS装置

在设备运行过程中,传统机械操动机构故障隐

患较高，监控与维护不及时，导致设备运行维护成本居高不下，且难以实现精准控制与状态监测^[2]。传统高压开关设备在数字化与智能化水平方面较为滞后，缺乏实时监测与故障预警功能，难以满足智能电网建设对设备可靠性与可维护性的要求。同时，传统设备的制造工艺与材料选用方面尚未充分考虑低碳环保因素，生产过程中的碳排放和环境影响较大。随着能源互联网与新型电力系统建设的深入推进，智能低碳环保型高压开关设备的研发需求日益迫切，特别是在光伏发电、风力发电等新能源并网应用场景中，对设备的环保性能、智能化水平和运行可靠性提出更高要求。

智能低碳环保型高压开关设备的设计方案

1. 整体结构设计优化

针对72.5 kV高压开关设备运行过程中的结构可靠性问题，开展整体结构设计优化研究。分析表明，设备关键部件电磁场空间分布具有较高的敏感性和脆弱性，在恶劣运行环境中极易引发设备运行参数偏离。电磁场分布异常包括结构设计或生产工艺不良、运输或安装不当等，可能导致高压绝缘破坏、电场击穿或大电流短路等故障。基于以上分析，从以下三个方面进行深入优化。

1) 在电场均匀分布方面，采用三维电场仿真技术和空间布局优化算法，对各部件之间的电场分布进行精确计算和优化^[3]。通过建立电磁场有限元分析模型，结合遗传算法和粒子群优化方法，构建考虑多目标约束的布局优化模型。优化后电场强度均匀度从72%提升至91%，局部最大场强从4.2 kV/mm降低至3.15 kV/mm，显著提升设备的电气绝缘性能，见表1。

表1 电磁单元优化前后性能对比参数

性能参数	优化前	优化后	提升比例 (%)
电场强度均匀度 (%)	72	91	26.4
局部最大场强	4.2 kV/mm	3.15 kV/mm	25
绝缘电阻稳定性 (%)	±15	±10	33.3
抗电晕能力	3.8 kV	4.7 kV	23.7
密封性能 (IP等级)	IP65	IP67	-

2) 在CVI优化方面，重点解决因温度变化和環境潮气引起的绝缘电阻降低问题。通过改进复合绝缘结构设计，在传统环氧树脂基础上引入纳米SiO₂改性技术，提升绝缘材料的热稳定性和抗吸湿性

能。同时，采用多层屏蔽结构和优化的电极形状设计，增强设备的抗电晕能力。改进后的CVI性能在95%相对湿度环境下仍能保持稳定，绝缘电阻降幅控制在10%以内。

3) 在故障根源预防方面，针对高温、高湿和高盐等恶劣环境因素，采取全方位的防护措施。开发具有自修复功能的纳米复合密封材料，采用“双层壳体+缓冲层”的防护结构，并集成基于光纤传感的全断面应力监测系统，实现对结构薄弱环节的实时监控。通过这些预防性措施的综合应用，显著提升设备在恶劣环境下的适应性和可靠性。

2. 智能化系统设计

智能化系统设计以状态监测、故障诊断和智能控制为核心，构建基于物联网技术的智能感知平台^[4]。系统采用分布式架构，集成多维传感器网络，建立设备健康状态实时监测体系。在数据采集层面，通过边缘计算节点实现数据的预处理和分析；在数据处理层面，基于深度学习算法构建设备状态评估模型，建立健康状态评价指标体系；在控制执行层面，设计基于模糊控制的智能决策系统，实现设备运行的自适应调节。该系统显著提升设备的可靠性和维护效率，为设备的智能化监控、数字化运维管理提供有力支撑。

3. 低碳环保技术应用

低碳环保技术应用主要围绕清洁空气绝缘介质的工程化应用展开，建立基于80% N₂和20% O₂混合气体的绝缘系统。在绝缘设计中，混合气体的击穿电压强度计算采用改进的Paschen公式

$$U_b = \frac{B \cdot pd}{\ln(A \cdot pd) - \ln(\ln(1 + \frac{1}{\gamma}))}$$

式中，U_b为击穿电压；p为气体压力；d为电极间距；A、B为气体的电离系数；γ为次级电子发射系数。

通过优化气体压力控制系统和密封结构设计，实现绝缘气体的长期稳定性和可靠性。在气体监测方面，研发智能气体监测装置，采用色谱分析技术对绝缘气体的成分、压力和温度等参数进行实时监测，建立气体状态评估模型。在材料应用方面，采用环保型固体绝缘材料并进行表面改性处理，显著提升绝缘性能。同时通过优化生产流程、采用节能设备等措施，降低生产过程中的能耗和污染物

排放。

4. 设备可靠性设计

可靠性设计立足于全寿命周期理念，通过建立设备失效模式与影响分析（FMEA）模型，识别并消除潜在的可靠性风险。针对恶劣环境应用场景，重点开展设备的环境适应性设计：在密封性设计方面，采用多重密封结构和新型密封材料，有效防止潮气和盐雾的侵入；在防腐设计方面，通过表面处理工艺和防腐涂层的优化，提升设备的耐腐蚀性能；在机械强度设计方面，考虑风载荷和振动影响，优化支撑结构和紧固方式。同时，建立基于加速寿命试验的可靠性评估体系，通过在极端环境条件下的验证试验，确保设备在各种工况下的稳定运行^[5]。这些设计措施的实施，显著提升智能低碳环保型高压开关设备的运行可靠性和使用寿命。

优化方案的实验验证与评估

1. 智能化性能测试

智能化性能测试主要围绕状态监测准确性、故障诊断可靠性和控制响应及时性三个维度展开，测试指标体系见表2。在状态监测准确性测试中，采用标准工况下的对比试验方法，通过投入不同类型的传感器采集运行参数，验证监测数据的准确度达到98.5%，优于传统监测系统的95%水平。故障诊断可靠性测试采用故障模拟与实际运行数据相结合的方式，通过构建典型故障数据库，对系统的故障识别能力进行全面评估，结果表明系统对典型故障的识别准确率达到96.2%，故障预警提前量可达72 h。在控制响应性能测试中，针对操动机构的动作特性进行评估，验证在各种工况下操动机构的动作时间均能满足 IEC 62271标准要求，且动作特性曲线的重复性误差控制在±3%以内，显著提升设备的操作可靠性。

表2 智能化性能测试指标体系

测试项目	具体指标	测试结果	标准要求
状态监测准确性	参数测量准确度 (%)	98.5	≥95
	数据采样频率/kHz	10	≥5
	响应时间/ms	<50	≤100
故障诊断可靠性	故障识别准确率 (%)	96.2	≥90
	故障预警提前量/h	72	≥48
	误报率 (%)	1.2	≤2
控制响应及时性	动作时间/ms	<50	≤60
	重复性误差(%)	±3	≤±5
	可靠动作次数	10 000	≥8 000

2. 低碳指标评估

低碳指标评估重点考察设备在生产制造和运行过程中的能耗水平与碳排放情况。通过建立设备全生命周期碳足迹评估体系，对生产制造环节的能源消耗、原材料使用及废弃物处理等环节进行系统评估，见表3。在生产制造环节，通过采用新型环保材料和优化制造工艺，单台设备的制造过程碳排放较传统工艺降低38.5%。运行过程中，得益于智能化控制系统的优化调节和清洁空气绝缘介质的应用，设备运行能耗降低42.3%，年碳减排量达到15.6 t。从全生命周期来看，新型设备的碳排放强度较传统设备平均降低41.2%，充分体现低碳设计的显著成效。

表3 设备全生命周期碳排放评估结果

评估阶段	评估项目	优化后碳排放	传统设备碳排放	降低比例 (%)
生产制造	能源消耗	2.8 t CO ₂ e	4.5 t CO ₂ e	37.8
	原材料使用	3.2 t CO ₂ e	5.3 t CO ₂ e	39.6
	废弃物处理	0.6 t CO ₂ e	1.0 t CO ₂ e	40.0
运行维护	年均能耗	1.2 t CO ₂ e	2.1 t CO ₂ e	42.3
	维护排放	0.3 t CO ₂ e	0.5 t CO ₂ e	40.0
报废处理	材料回收	0.4 t CO ₂ e	0.7 t CO ₂ e	42.9
	处置排放	0.2 t CO ₂ e	0.4 t CO ₂ e	50.0

3. 环保性能验证

环保性能验证主要针对设备的污染物排放、材料可回收性和环境适应性等方面进行评估。在污染物排放方面，通过采用清洁空气替代SF₆气体作为绝缘介质，彻底消除温室气体排放，绝缘气体泄漏率控制在0.1%/年以下，远优于传统SF₆设备1%/年的标准要求。材料可回收性评估显示，设备采用的新型绝缘材料和结构件可回收率达到95%以上，较传统设备提高15个百分点。环境适应性测试结果表明，设备在-40℃~+50℃的温度范围内，以及高达95%相对湿度的环境中均能保持稳定运行，充分满足恶劣环境下的应用需求。

4. 综合优化效果分析

通过对智能化性能、低碳指标和环保性能的综合评估，验证优化设计方案的实施效果。智能化监测和控制系统的應用使设备的平均无故障运行时间延长35%，维护成本降低45%。从经济性角度看，虽然设备初始投资较传统设备增加12%，但通过节

能降耗和维护成本的降低，投资回收期控制在3.5年以内。设备的碳排放强度和污染物排放显著降低，完全符合国家电网公司对新一代环保型开关设备的技术要求。

结束语

通过对智能低碳环保型高压开关设备的系统研究，创新性地提出开关设备优化设计方案，成功应用环保绝缘介质替代SF₆气体，实现设备的智能化运维。研究成果显著提升高压开关设备的节能环保性能，具有重要的工程应用价值。实验数据证实，该设计方案在保证设备可靠性的同时，实现低碳环保的发展目标，为电力设备的绿色转型提供有效途径。EA

(收稿日期：2025-04-25)

(上接第44页)

学习模型，在GTX 3080显卡上训练，诊断延时控制在200 ms内；维护决策模块结合设备健康度评估和剩余寿命预测，通过移动终端向维护人员推送检修建议。

3. 效果评估

系统在某火电厂4台600 MW机组上进行了为期6个月的试运行验证。实时监控功能的数据刷新延时平均为120 ms，故障诊断准确率达到93.5%，预测性维护建议采纳率为85%，系统整体运行稳定可靠。通过对比系统投运前后的运行数据，设备故障率显著降低，维护效率明显提升，具体效果评估数据见表2。

表2 系统应用效果对比分析

评估指标	系统投运前	系统投运后	改善程度 (%)
设备故障率	3.2次/月	1.5次/月	53.1
平均检修时间	24.5 h	16.8 h	31.4
非计划停机时间	12.6 h/月	5.3 h/月	57.9
维护成本	86.5万元/月	52.8万元/月	39.0
设备可利用率 (%)	92.3	96.8	4.9
故障预警提前量	24h	72 h	200.0
误报率 (%)	8.5	3.2	62.4

结束语

基于大数据技术的发电厂生产计划优化调度研究，通过整合多源数据，建立预测模型和优化算

参考文献

[1] 鞠关权, 李德军, 刘志民, 等. 环保型高压开关设备洁净空气质量检测 [J]. 高压电器, 2023, 59 (9): 184-192.

[2] 宋强强. 基于深度学习的变电站高压开关设备智能化改造研究[J]. 电气技术与经济, 2024(7): 7-9.

[3] 邵雅俊. 智能技术在高压开关设备中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(7): 246-247.

[4] 张宇洲. 浅析智能高压开关设备的技术[J]. 中国设备工程, 2024(9): 36-38.

[5] 赵启. 环保高压开关技术和设备研究现状及展望[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 16-24.

法，实现了调度过程的智能化和精确化。该方法不仅提高发电效率，降低运行成本，而且为发电企业的智能化转型提供可行路径。未来研究将进一步探索深度学习、强化学习等先进算法在发电调度中的应用，提升模型的适应性和鲁棒性。EA

(收稿日期：2024-11-25)

参考文献

[1] 夏稀渊. 基于大数据分析的火电厂调频调峰优化研究[J]. 信息技术与信息化, 2024(10): 190-193.

[2] 王娇, 李依哲, 绍帅. 火力发电厂数字化转型的新兴技术应用探讨[J]. 中国设备工程, 2024(21): 207-209.

[3] 马文杰, 李敬君, 程龙, 等. 大数据技术在火电厂集控运行中的应用[J]. 现代工业经济和信
息化, 2024, 14(8): 87-89.

[4] 王成. 基于大数据的发电厂设备智能无线点巡检管理系统研究[J]. 大众标准化, 2024(13): 170-172.

[5] 王福君. 数字化技术在660 MW发电厂电气监控系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(4): 170-171.