

干燥空气绝缘开关设备关键技术研究综述

邢倩倩¹ 常广勇² 何溪康¹ 李燕超¹

1 许继德理施尔电气有限公司 河南 许昌 461000

2 河南许继电力电子有限公司 河南 许昌 461000

摘要:在中压开关设备领域,传统 SF₆ 因极高的全球变暖潜能值 (GWP≈23500) 面临严苛环保约束。用干燥空气替代 SF₆ 作为绝缘介质,可从源头实现零温室效应、零有害分解产物且无需回收处理,是构建绿色电力系统的优选路线。本文围绕电场均匀化设计、固体绝缘沿面耐电优化等四项关键技术展开研究,通过多物理场耦合仿真、材料选型与工艺试验,研制出 40.5kV/2500A-31.5kA 干燥空气绝缘开关设备样机。相关型式试验结果显示,样机的工频、雷电冲击耐受电压及局部放电等指标优于国家标准,温升、短路开断能力满足工程运行要求,设备全寿命周期环保特性突出,可为新一代环保型中压气体绝缘开关设备的工程推广提供完整技术支撑。

关键词:干燥空气绝缘;环保型开关设备;电场优化;微水控制;温升抑制

引言

中压 GIS 柜因结构紧凑、免维护周期长、环境适应性强,广泛应用于城市配电网、新能源场站及工矿场景。长期作为核心绝缘介质的 SF₆, GWP 约为 CO₂ 的 23500 倍,属《京都议定书》限排温室气体,欧盟已要求中压 GIS 逐步淘汰 SF₆,我国“双碳”战略也推动电力装备零碳升级,无 SF₆ 环保中压开关已成为行业研究热点。

替代方案中露点 ≤ -40℃ 的洁净干燥空气 GWP 为 0、无毒无液化、无需回收,是中压领域最具潜力的环保绝缘介质,但其绝缘强度仅为 SF₆ 的 0.35 倍,散热弱且对微水、固体绝缘界面敏感,需在多维度开展系统性技术攻关。

本文以 40.5kV 典型电压等级为目标,围绕干燥空气绝缘开关的绝缘设计理论、核心部件、密封干燥技术及温升抑制方法展开研究,经样机研制与型式试验验证,形成了一套可工程复制的完整技术体系。

1 干燥空气绝缘特性分析及绝缘结构优化设计

1.1 干燥空气与 SF₆ 绝缘特性对比

均匀电场常温下,0.1MPa 绝对压力的干燥空气击穿场强约 3.0kV/mm,仅为同条件下 SF₆ 的 35% 左右。提升干燥空气绝缘强度可通过提压、优化电场均匀度、增大绝缘距离实现,但中压开关需兼顾成本与体积,无法无限制提升参数。结合帕申定律与工程经验,本文将 40.5kV 设备的干燥空气绝对充气压力设定为 0.13MPa (表压 0.03MPa),该参数下壳体重量与成本可控^[1]。

此时干燥空气工频击穿场强仍远低于同压力 SF₆,因此需严格控制电场不均匀系数,精细优化固体绝缘件沿面耐电结构^[2]。

1.2 电场均匀化设计方法

采用三相共箱或分箱布置方案,基于有限元法对导电回路、壳体及屏蔽罩开展三维静电场仿真。设定两项核心设计目标:一是导体表面最大场强低于干燥空气许用场强,且裕度不小于 15%;二是通过优化屏蔽罩曲率与位置,将电场不均匀系数控制在 1.2 以内。针对 40.5kV 设备,在 0.15MPa 干燥空气工况下,将高压导体表面最大场强控制在 4.0kV/mm 以下,屏蔽罩边缘做大圆弧处理并增设分压环,使电场接近均匀场。通过参数化寻优确定相间、相对地距离,兼顾绝缘性能与柜体紧凑性^[3-9]。

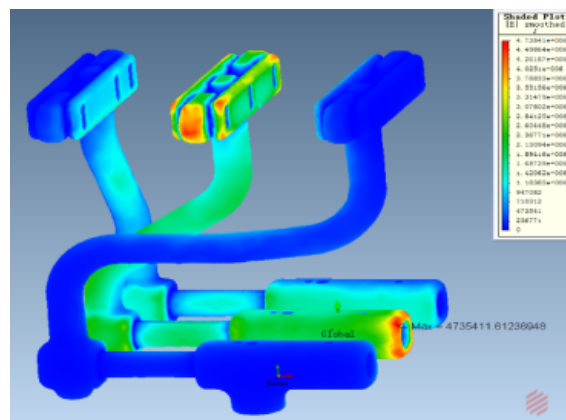


图 1 导体电场仿真的图片

1.3 固体-气体界面绝缘强化

在干燥空气中,环氧树脂绝缘件沿面闪络电压比在 SF_6 中下降更为显著,且对表面粗糙度、尘埃和水分极为敏感。设计中采取了以下措施:

将真空灭弧室固封于环氧树脂极柱内,采用自动压力凝胶工艺保证界面无气隙,并在极柱外表面增设多道伞裙,增加爬电距离不小于传统 SF_6 柜的 1.3 倍;

优化绝缘子表面电场,通过嵌入内部屏蔽电极,迫使沿面切向场强最大值控制在 0.8 kV/mm 以下;

严格控制浇注工艺,绝缘件表面粗糙度 $R_a \leq 1.6 \mu\text{m}$,并进行局部放电筛选,要求 1.1 倍最高工作相电压下局放量 $< 2 \text{ pC}$ 。

这些设计有效抑制了干燥空气环境中固-气界面的局部放电和闪络概率,使沿面绝缘耐受水平与纯气体间隙相匹配^[10]。

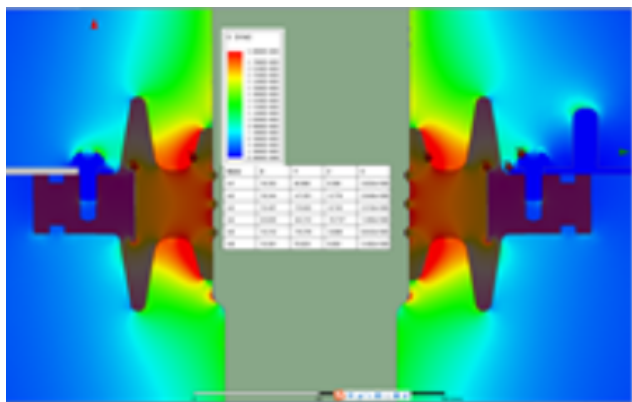


图 2 绝缘件电场仿真图片

2 气室密封与微水控制技术

干燥空气设备虽允许极微量泄漏自然补充,但为保障绝缘稳定性、避免内部凝露,要求全寿命周期内气室露点维持在 -40°C 以下。为此本文形成“高气密壳体+高效吸附+在线监测”的微水控制方案:壳体采用不锈钢焊接密封与端框 O 型圈双重防护,盖板、操作轴动密封采用双道氟橡胶结构,经氦质谱检漏确保年泄漏率低于 0.1%;气室内设置可更换的 13X 分子筛干燥剂仓,可长期将内部露点稳定在 -50°C 左右;每台设备可配置数字式露点传感器,实时监测水分并远传后台,露点高于 -35°C 时触发预警,提示运维更换干燥剂或开展气室干燥。高低温循环试验验证, $-25^\circ\text{C} \sim +55^\circ\text{C}$ 环境下内部露点波动不超过 6K,无凝露风险。

3 大电流温升与散热设计

干燥空气综合散热能力显著弱于 SF_6 ,同电流下设备

温升问题更突出。针对 40.5kV、2500A,建立了包含导体、触头、灭弧室及气室在内的流-热耦合仿真模型。采取如下对策:

主导电回路选用高导电率 T2 紫铜,搭接面镀银处理,接触电阻严格控制在 $10\mu\Omega$ 以内;

在固封极柱上端及三工位静触头后方布置铝合金散热片,充分利用气室内部空气自然对流通道;优化气室形状,形成“底部冷空气 → 流经受热部件 → 顶部热空气 → 壳体散热”的循环路径;

壳体外部采用瓦楞加强筋结构,增大辐射和对流散热面积。

温升试验结果表明,40.5 kV/2500 A 样机主回路温升为 59.3 K,裕度充足。连续通流状态下局部放电无异常,证明热场对绝缘无不良影响。

4 样机研制与型式试验

基于上述关键技术,研制了 NISELA 40.5-2500/31.5 干燥空气绝缘开关设备样机,并委托国家级检测中心依据 GB/T 3906、GB/T 11022 等标准完成全套型式试验,主要项目及结果如下。





图3 型式试验照片

绝缘试验工频耐压 95 kV, 雷电冲击耐压 185 kV, 局放 < 5 pC。

温升试验如前所述, 40.5kV/2500A 温升均低于限值, 且经红外测温未见异常热点。

短路开断与关合试验 40.5kV/31.5kA 通过全部出线端短路试验序列。隔离/接地开关完成转移电流开断试验, 操作 100 次后触头无明显烧蚀, 回路电阻变化小于 20%。

密封与环境试验经氦检漏和长期保压测试, 年泄漏率小于 0.05%; 在环境温度 $-25^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$, 湿度 95% 条件下运行, 内部露点稳定, 绝缘强度未下降。外壳防护等级达到 IP65。

型式试验全面合格, 表明干燥空气绝缘开关设备在关键技术指标上达到了传统 SF_6 柜的同等水平, 且环保性能全面超越。

5 结论

1) 以干燥空气替代 SF_6 作为中压开关绝缘介质,

是实现零温室效应、全寿命低碳化的可行路线。本文针对干燥空气绝缘强度低、散热弱的核心瓶颈, 从电场优化、固气界面绝缘强化、微水管控、散热增强四个维度完成技术突破。

2) 40.5kV 样机全项型式试验验证了方案有效性: 在表压仅 0.03~0.05MPa 的低充气压力下, 设备绝缘耐受、局部放电指标优异, 温升与开断能力满足现行国标, 具备长期安全运行条件。

3) 本文形成的成套设计方法与工艺规范, 可直接支撑不同参数等级的干燥空气绝缘设备开发, 推动中压环保气体开关规模化工程应用, 助力新型电力系统建设与“双碳”目标落地。

参考文献

- [1] 李建基, 冯健, 王建华. 环保型中压气体绝缘开关设备的技术进展 [J]. 高压电器, 2022, 58(4): 1-10.
- [2] 周远翔, 沙彦超, 聂德鑫. 13X 分子筛用于干燥空气开关设备微水控制的长效性研究 [J]. 绝缘材料, 2023, 56(2): 67-73.
- [3] 殷卫东, 马明, 戴志辉. 干燥空气绝缘环网柜绝缘结构优化设计 [J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1975-1982.
- [4] 全国高压开关设备标准化技术委员会. 3.6 kV ~ 40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备: GB/T 3906—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [5] IEC. 高压开关设备和控制设备第 1 部分: 通用规范: IEC 62271-1: 2017[S]. 日内瓦: IEC, 2017.
- [6] 刘洋, 张猛, 赵林. 中压环保气体绝缘开关设备微水控制与密封技术研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 121-128.
- [7] 陈维江, 李成榕, 司马文霞. 真空断路器固封极柱外绝缘在干燥空气中的放电特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5270-5280.
- [8] 林莘, 李鑫涛, 徐建源. SF_6 替代气体在电力开关设备中的应用研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7279-7292.
- [9] 赵志强, 李华, 高飞. 干燥空气在不同电场不均匀度下的工频击穿特性研究 [J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 935-942.
- [10] 马宏明, 黄道春, 阮江军. 基于遗传算法的干燥空气绝缘开关设备屏蔽电极优化设计 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1689-1697.