

关于大电流气体绝缘开关设备的研究与应用

孙伟鹏^{1,2} 汤清双^{1,2} 宋小纳³ 董 罔^{1,2}

1. 许继电气股份有限公司 河南许昌 461000

2. 许继德理施尔电气有限公司 河南许昌 461000

3. 河南升环劳务派遣有限公司 河南郑州 450041

摘要: 随着我国能源转型升级, 新能源行业也快速发展。不同于电网对进线柜负荷的要求, 新能源行业对于主变进线柜电流要求更高。对与电网变电站来说, 35kV线路主变进线电流一般为2500A, 而在新能源行业中, 主变进线电流要求3150A甚至4000A。现有的气体绝缘开关设备, 受制于产品尺寸、绝缘水平、散热要求等, 3150A以上的大电流气体绝缘开关设备存在较大难点。本文通过对国内外大电流气体绝缘开关设备的市场需求、产品现状、技术难点及实现方式、工艺控制、应用场景等方面进行了研究, 指明了未来大电流气体绝缘开关设备的发展的方向, 为大电流气体绝缘开关设备的发展应用奠定了基础。

关键词: 大电流; 气体绝缘开关设备; 载流能力; 散热技术

引言

随着全球能源的加速转型, 电力系统容量不断提升。为了降低成本, 提升投资收益, 供电系统中馈线柜的数量不断增加, 导致主变进线柜的电流不断增大, 2500A电流已经无法满足需求。从经济效益上考虑, 3150A电流的主变进线, 较2500A电流的主变进线容量能够提升58%, 4000A电流的主变进线, 较2500A电流的主变进线容量提升156%。因此, 更大电流的气体绝缘开关设备已经成为迫切需要。

一、大电流气体绝缘开关设备的市场需求

2024年中国市场规模已达150亿元, 预计2030年将增至280亿元, 年复合增长率达8.5%。其需求增长呈现出细分领域差异化、区域发展梯度化的特征, 具体体现在以下方面:

输配电系统: 作为最大应用市场, 2024年占比70%, 主要源于城市配电网改造和电网智能化升级, 如华东、华南的城市变电站替换传统空气绝缘开关设备, 对40.5kV气体绝缘开关设备需求持续稳定。

工业用电领域: 2024年占比20%, 预计2030年升至25%, 工业企业用电负荷提升推动对设备稳定性、可靠性的需求, 数据中心、轨道交通等新基建领域更是催生

了定制化中压气体绝缘开关设备需求。

新能源发电领域: 2024年占比仅10%, 预计2030年翻倍至20%, 风电、光伏电站并网对40.5kV大电流气体绝缘开关设备需求激增, 海上风电用紧凑型大电流气体绝缘开关设备年均增速达15%以上。

海外市场: 东南亚、中东的电力基建需求推动出口, 2025年出口规模28亿元, 2030年将达50亿元, 中国企业的性价比优势成为核心竞争力, 预计海外市场需求会进一步激增。

因此, 大电流气体绝缘开关设备正处于市场需求的旺盛期, 需要开关设备制作商大力发展。

二、大电流气体绝缘开关设备的产品现状

目前国内外具备小电流(1250A及以下)气体绝缘开关设备的厂商已经形成一定规模, 而高电压、大电流气体绝缘开关设备由于技术要求高, 产品工艺复杂, 具有较大的开发难度, 国内外仅有数家厂家具备生产能力。

(一) ABB公司大电流气体绝缘开关设备的现状

ABB公司推出的ZX2系列气体绝缘开关设备, 具备产品可靠性及安全性高, 结构紧凑等特点, 高压部分免维护, 极大的减轻了运行维护工作量, 经过大量的工程应用, 得到了市场的普遍认可。

(二) 西门子公司大电流气体绝缘开关设备的现状

2019年11月, 在上海国际电力电工展会上, 西门子在中国首次推出8DA/B系列气体绝缘开关设备。该设备采用单相分体式设计, 单相导体密封在圆柱形的气室内部, 相比箱式七绝缘开关设备产品, 这样的设计可以

作者简介: 孙伟鹏(1989-), 男, 汉族, 河南许昌人, 大学本科, 电气中级工程师, 研究方向为电气设备(环网柜、气体绝缘开关设备、一二次融合等)设计工作。

获得更好的绝缘性能和散热能力。

（三）上海平高天灵大电流气体绝缘开关设备的现状

希捷爱斯（上海）电气有限公司系上海天灵开关厂与德国DECOM公司合资成立的公司，N2S/N2X型充气柜为该公司的主导产品，其电压等级为12kV、24kV、40.5kV。其中12kV级充气柜用氮气绝缘，24kV级用SF6+N2混合气体绝缘，40.5kV级用SF6气体绝缘。上海天灵开关厂依托德国技术，在气体绝缘开关设备方面取得了优异成绩，尤其通过气体绝缘研究在该行业独树一帜，更是在竞争激烈的充气柜市场站稳了步伐。

三、大电流气体绝缘开关设备的技术难点

气体绝缘开关设备将一次主回路密封在不锈钢气室内部，可以保证一次回路的绝缘性能不受大气环境的影响，随着中压气体绝缘开关设备的不断大量应用，其可靠性和安全性已经得到广泛验证。

然而，由于气体绝缘开关设备的主导体密封在不锈钢气室内部，主导体的发热难以快速传递到外部环境中，气体绝缘开关设备的散热问题成为制约大电流气体绝缘开关柜的难点。同时，虽然绝缘能力较好的SF6气体绝缘能力是空气绝缘强度的3倍，但当局部电场不均匀时，电场剧烈畸变，其绝缘强度急剧下降，电压等级越高对其绝缘性能要求越严酷，绝缘问题是制约气体绝缘开关设备的另一主要难点。

（一）温升技术难点

大电流气体绝缘开关设备的温升技术难点主要体现在热量产生集中在气箱内、散热路径制约、绝缘与散热的性能存在冲突，以及采用环保气体的热特性适配性不足等方面，这些难点相互交织，成为制约设备大容量化、小型化发展的核心瓶颈。具体可分为以下几类：

1. 热量产生与积聚的先天缺陷

大电流气体绝缘开关设备的额定电流常达3150A及以上，主回路的导体损耗、接触电阻损耗、涡流损耗会高度集中在密封气室内部，尤其在母线触点、断路器动静触头等部位，热量易形成局部高温区，长期运行会导致接触电阻进一步增大，形成“温升-损耗增加-温升加剧”的恶性循环。另外就是气体对流散热能力弱，气体绝缘开关设备气室为密闭结构，内部绝缘气体处于一定压力下，气体对流受空间限制且流速缓慢，无法通过自然对流有效带走热量；同时气室内部温度梯度均匀，缺乏驱动气体流动的温差动力，热量只能通过传导和辐射散出，效率远低于开放空间。

2. 散热路径设计的技术限制

为保证绝缘安全，大电流气体绝缘开关设备内部需保持严格的电气间隙和表面光滑度，无法在气室内安装

风扇、散热片等主动散热装置；若在外外部增加散热结构，又会受设备小型化、密封性要求的制约。大电流气体绝缘开关设备的导体需采用高导电率材料（主要为铜），但绝缘部件如支柱绝缘子、绝缘拉杆、灭弧室多为低热导率的陶瓷或环氧树脂，这些部件会阻断热量传导路径；同时，为提高绝缘性能而增加的气体压力，会进一步限制壳体的散热结构设计。

（二）绝缘技术难点

大电流气体绝缘开关设备的绝缘技术难点集中在电场畸变难以控制、气-固界面电荷积聚、环保气体绝缘性能适配不足以及外部环境与杂质的干扰等方面，这些难点相互制约，成为设备向更高电压、更大电流等级发展的核心障碍。具体体现如下：

1. 电场分布不均引发的局部放电风险

大电流气体绝缘开关设备的导体额定电流常达3150A以上，高压导体与金属外壳、绝缘子的间隙处易形成电场集中区，尤其是母线接头、绝缘子金属嵌件等尖角部位，电场强度可达到平均场强的3~5倍，极易引发局部放电，长期放电会侵蚀绝缘材料，最终导致绝缘击穿。大电流气体绝缘开关设备运行时，导体产生的焦耳热会使柜体内部形成显著温度梯度，温度变化会改变绝缘气体和固体介质的介电常数，进一步破坏电场分布的均匀性，使绝缘子沿面耐电强度下降15%以上。

2. 气-固界面电荷积聚的绝缘失效难题

在直流电压作用下，大电流气体绝缘开关设备的绝缘子的气-固界面会持续积聚空间电荷，尤其是极性反转、雷电冲击等极端工况，电荷分布失衡会引发严重的电场畸变，导致沿面绝缘强度大幅下降，成为直流大电流气体绝缘开关设备绝缘系统的最薄弱环节。目前对电荷在绝缘界面的输运、俘获和脱陷机制尚未完全明确，难以通过仿真精准预测电荷分布，只能依靠实验摸索，导致绝缘子结构优化设计周期长、成本高。

（三）其他技术难点

除了绝缘和温升两大核心技术难点外，大电流气体绝缘开关设备还面临机械可靠性、智能化集成、环保合规适配、极端工况适应性等多个维度的技术挑战，这些难点直接影响设备的长期稳定运行，具体如下：

1. 机械传动与密封可靠性难题

大电流气体绝缘开关设备的断路器、隔离开关等元件在分合闸操作时，会承受短路电流产生的巨大电动力冲击，额定电流3150A以上的设备，短路电动力可达数十千牛，易导致传动机构变形、触头磨损加剧，甚至出现分合闸拒动、弹跳超标等故障；同时，长期运行的机械磨损会增大传动间隙，降低操作精度。

2. 小型化与大容量的设计矛盾

电网建设对大电流气体绝缘开关设备的占地面积要求越来越高,设备小型化需压缩内部绝缘间隙、优化导体布局,但这会进一步加剧电场畸变和热量积聚,与温升、绝缘的技术要求形成矛盾;例如,紧凑型母线结构会导致涡流损耗增加,局部温升超标风险上升。大电流气体绝缘开关设备的导体需承载3150A以上电流,传统单一铜导体的载流能力接近极限,而新型高导电率材料(如铜铬锆合金)的加工难度大、成本高,且与绝缘件的热膨胀系数匹配性差,易引发界面应力开裂。

四、大电流气体绝缘开关设备的实现方式

(一) 导电与温升控制结构设计

可采用薄壁铝镁合金管导体(壁厚3~5mm)或多层铜排,利用集肤效应提升导流密度,4000A等级导体截面 $\geq 1200\text{mm}^2$;接头处采用镀银处理,镀层厚度 $\geq 8\mu\text{m}$,降低接触电阻至 $\leq 30\mu\Omega$,减少接触损耗。3150A及以下散热系统采用自然风冷散热:外壳采用波纹状散热结构,增大散热面积30%;气室内壁敷设铜质吸热板,快速传导导体热量;4000A及以上采用风机辅助散热:配置内置微通道散热导管(竖直布置),配合顶部低噪音引风机(风量 $\geq 5\text{m}^3/\text{h}$),实现强制对流散热,温升降低15~20K。气室分区设计:将断路器与母线气室独立分隔,避免热量交叉积聚。

(二) 绝缘系统优化设计

导体电极采用圆弧过渡设计(圆角半径 $\geq 10\text{mm}$),绝缘子金属嵌件做倒棱处理,降低局部场强集中,控制在平均场强3倍以内;采用三支柱绝缘子,优化伞裙结构,伞裙间距 $\geq 25\text{mm}$,减少沿面电荷积聚,提升沿面绝缘强度。

五、大电流气体绝缘开关设备的工艺控制

(一) 气箱装配工艺

装配车间等级至少为百万级,温湿度控制在 $20\pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度40%~60%;零部件装配前可经超声波清洗,烘干温度 $80^\circ\text{C}\pm 5^\circ\text{C}$,烘干时间 $\geq 2\text{h}$;操作人员穿戴防静电洁净服,禁止携带金属碎屑、纤维等杂质进入车间。密封面法兰密封面打磨至 $Ra\leq 0.8\mu\text{m}$,涂抹专用密封胶;绝缘子安装采用力矩扳手均匀紧固螺栓,同轴度偏差 $\leq 2\text{mm}$;导向套辅助定位,对接后导体间隙 $\leq 0.1\text{mm}$,避免接触不良导致局部温升。

(二) 气室抽真空与充气

采用真空氦检漏设备抽真空至 $\leq 100\text{Pa}$,排除水分与空气;现场维修时充气采用分级充气法,上下气箱依次先充至 -0.05MPa ,再充至额定压力 0.01MPa ,依次交替充气到额定气压,避免气箱变形,充气后续测试气体

露点 $\leq -60^\circ\text{C}$ 。

六、大电流气体绝缘开关设备的应用场景

(一) 电网建设领域

一线城市核心区、老旧城区配电网改造,如北京通州副中心、上海临港新片区的12kV/40.5kV城市变电站。因土地资源紧张,要求设备小型化、人口密集区环保要求高,禁用高GWP气体、负荷波动大,需耐受频繁电流冲击。大电流气体绝缘开关设备体积较传统空气式开关柜设备缩减15%,支持地下变电站、紧凑型开关柜安装,适配城市高温高湿环境。

(二) 新能源并网领域

陆上百万千瓦级风电场、海上风电场(如广东阳江、江苏大丰海上风电项目)的升压站,额定电压40.5kV,适配风机集群并网。海上场景高盐雾、高湿度,要求设备防护等级 $\geq \text{IP67}$,陆上场景温差大($-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$),电流波动性强。采用大电流气体绝缘开关设备时,外壳可采用316L不锈钢+氟碳涂层防腐,绝缘子伞裙优化防污闪设计;触头选用耐烧蚀铜钨合金,机械寿命 ≥ 10000 次,支持日均20次分合闸;海上机型采用模块化设计,便于吊装与维护。

(三) 光伏电站

西北荒漠集中式光伏基地(如青海塔拉滩)、工商业分布式光伏项目的升压系统,额定电流2500A~4000A。尤其是 $\geq 3000\text{m}$ 的高海拔和低气压环境、昼夜温差大、并网时谐波干扰明显,尤其适用大电流气体绝缘开关设备。

(四) 工业用电领域

超大型数据中心(如阿里云张北数据中心)的10kV/35kV配电系统,承担服务器集群、冷却系统的供电保障,额定电流3150A~5000A。大电流气体绝缘开关设备可适用24小时连续运行、空间紧凑、低噪音等需求。

结论

大电流气体绝缘开关设备相较于传统的气体绝缘开关设备,其应用场合更广泛,且具有更高的性价比,其市场规模在逐步提升。但产品技术难度大、工艺控制能力更高,是未来气体绝缘开关设备的发展趋势。

参考文献

- [1]DL/T 603-2006 气体绝缘金属封闭开关设备运行及维护规程.
- [2]赵莉华, 邬志云等.基于新型环保气体的断路器温升特性[J].工程科学与技术.2024, 56(5)
- [3]杜伯学, 董佳楠等.特高压GIL非均匀热气流特性与三支柱绝缘子绝缘裕度分析[J].电工技术学报.2023, 38(6).