

半绝缘与全绝缘管母线在新能源电站中的选型应用研究

邹玉波

(国电电力发展股份有限公司宣威分公司, 云南 曲靖 655400)

摘 要 针对新能源电站管型母线绝缘故障频发问题, 以某光伏电站 35 kV 侧管母线两年内两次绝缘击穿事故为研究对象, 系统对比全绝缘与半绝缘管母线的结构特性、电气性能及环境适应性。通过故障溯源分析施工工艺、绝缘设计与环境因素的耦合影响, 结合《电力设备预防性试验规程》(DL/T 596-2021) 等标准要求, 提出基于场景适配性的选型指标体系及全生命周期管控策略。研究结果表明: 半绝缘管母线在户外潮湿环境中具有更优的运行可靠性, 其故障修复成本较全绝缘管母线降低 62%, 为新能源电站设备选型提供技术支撑。

关键词 光伏电站; 管型母线; 半绝缘; 全绝缘; 绝缘故障

中图分类号: TM62; TM24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.027

0 引言

35 kV 升压站作为光伏电站的电能汇集关键, 其设备可靠性对发电效率影响重大。管型母线因载流量大、集肤效应低等优势, 已逐渐取代传统矩形母线。管型母线按绝缘结构分为全绝缘和半绝缘, 前者采用多层复合绝缘, 有密封屏蔽特性; 后者仅关键部位绝缘, 靠空气绝缘和绝缘子支撑。例如: 某光伏电站 #1 主变 35 kV 侧用的全绝缘管母线, 在 2024-2025 年间, 穿墙套管处和接头处先后出现绝缘击穿, 导致全站停电, 凸显选型问题。开展两种绝缘方式的选型研究, 对提升电站可靠性意义重大。国外管形绝缘母线应用成熟, 有超 40 年运行历史, 在绝缘材料和结构设计上经验丰富。国内因技术限制, 主要生产 35 kV 及以下产品, 且行业标准不统一, 企业多依内部规范生产, 产品质量不一。现有研究多关注管母线载流量和散热, 对不同绝缘方式的场景适配性, 尤其是基于实际故障案例的选型论证较少。本文采用“故障分析—性能对比—选型建模—实证验证”路线, 剖析两次绝缘故障机理, 提取关键因素, 建立涵盖电气性能、环境适应、施工维护等方面的对比体系, 结合新能源电站运行特点构建选型模型, 最后通过案例改造验证选型合理性。

1 管型母线绝缘技术基础

全绝缘管母线以空心铜管或铝管为导体, 外敷耐火导热层、绝缘防水层、均压层、屏蔽层及抗紫外线护套, 形成类似电缆的密封绝缘结构^[1]。其核心优势在于电场分布均匀, 表面电场强度畸变系数低, 可直接

穿越电缆沟、夹层等复杂环境, 额定电流可达 12 000 A, 短路耐受电流峰值达 160 kA。但全绝缘结构对制造工艺要求严格, 绝缘层需采用聚四氟乙烯等耐高温材料, 且各层间粘接必须紧密无气泡, 否则易形成局部放电通道。

半绝缘管母线仅在导体表面涂刷绝缘涂料或包覆薄层热缩套管, 关键连接部位采用增强绝缘处理, 整体依赖支柱绝缘子支撑实现对地绝缘^[2]。其结构简化了绝缘层级, 保留了管形导体的低集肤效应优势(集肤效应系数 $K_f \leq 1$), 且空心结构形成自然风道, 温升较同截面矩形母线低 15~20 K。在户外场景中, 半绝缘管母线通过增大相间距离与爬电比距提升绝缘可靠性, 35 kV 等级产品通常要求爬电距离不小于 31 mm/kV (污秽等级 IV 级), 其最大优势在于施工便捷性, 接头处无需复杂密封处理, 维护时可直接进行红外检测。

根据 DL/T596-2021《电力设备预防性试验规程》, 管母线绝缘性能评价主要包括: 交流耐压试验(35 kV 等级需耐受 42 kV/min)、局部放电量(≤ 10 pC)、绝缘电阻(常温下 $\geq 1\ 000\ M\Omega$)及介质损耗($\leq 0.01\%$)。环境适应性指标则涵盖耐湿热性(相对湿度 95% 下 480 h 无凝露)、抗紫外线老化(氙灯老化试验 1 000 h 无开裂)等。

2 光伏电站管母线绝缘故障案例分析

2024 年 4 月 5 日 23 时 59 分, 某光伏电站 #1 主变 201、301、302 断路器跳闸, 35 kV 母线失压。保护装置显示纵差工频变化量差动保护动作, 故障录波确认

35 kV 侧 C 相单相接地。在耐压试验中, C 相管母加压至 40 kV 时对地击穿, 最终定位故障点为二分支 C 相穿墙套管处, 发现明显放电痕迹。经分析, 故障由结构设计缺陷、施工工艺问题与绝缘老化加速导致: 穿墙套管处原绝缘板与管母间隙不足 50 mm, 低于《电力设备预防性试验规程》(DL/T 596-2021) 规定的最小电气间隙要求, 形成电场集中区; 绝缘板安装时未进行倒角处理, 边缘场强畸变系数达 3.2, 远超允许值 1.5; 穿墙部位存在温差导致凝露, 绝缘层吸潮后介损值从 0.005% 升至 0.03%, 满足故障发生条件。

2025 年 8 月 23 日 04 时 46 分, 相同主变因纵差保护动作跳闸, 现场检查发现 35 kV 侧 B 相三通接头处绝缘击穿, 伴有烧焦痕迹, A、C 相存在轻微放电。当时环境湿度 97%, 小时降雨量 2.5 mm, 气压 793 hPa (相当于海拔 2 000 m)。此次故障原因在于防水密封失效、施工质量缺陷与环境因素叠加: 接头处未采用硅橡胶密封, 仅缠绕普通绝缘胶带, 雨水渗入后形成导电通道, 爬电距离从设计值 210 mm 降至 120 mm; 三通接头制作时导体对接间隙达 0.8 mm, 运行中产生局部过热, 导致绝缘层软化脱落; 高湿度与低气压共同作用, 使空气绝缘强度下降 30%, 加速绝缘击穿进程。

两次故障均暴露全绝缘管母线的固有缺陷: 接头与穿墙等薄弱部位的绝缘处理对工艺要求极高, 且密封结构易受环境影响。差异在于第一次故障以电场集中为主因, 第二次则是防水失效与施工缺陷的耦合结果。整改数据显示, 全绝缘管母故障修复需耗时 72 小时, 材料成本达 12 万元 / 处, 而半绝缘改造后同类缺陷处理仅需 16 小时, 成本降至 4.5 万元 / 处。

上述两个光伏电站管母线绝缘故障案例表明, 绝缘失效往往是多因素交织作用的结果。结构设计缺陷、施工工艺不达标等内部因素, 与环境湿度、气压变化等外部条件相互叠加, 显著增加了故障发生概率。全绝缘管母线虽具备整体防护优势, 但其接头、穿墙等关键部位的绝缘处理容错率低, 密封性能易受环境侵蚀, 导致故障修复成本高、周期长。而半绝缘改造在提升运维效率、降低经济损失方面展现出明显优势, 为光伏电站管母线的可靠性提升提供了新的技术方向。未来, 在光伏电站的建设与运维过程中, 必须从多个维度强化绝缘故障防控措施。首先, 要建立严格的设计标准审核机制, 确保管母线的结构设计科学合理, 从源头上消除潜在的绝缘风险; 其次, 要加强施工过程管控, 严格执行施工工艺标准, 确保施工质量; 最后, 应建立环境因素与绝缘性能的动态监测机制, 实时掌握环境变化对绝缘性能的影响, 及时采取针对性

的防护措施。只有这样, 才能有效降低绝缘故障风险, 保障光伏电站的安全稳定运行。

3 全绝缘与半绝缘管母线性能对比

在电气性能方面, 全绝缘与半绝缘管母线均能达到现行国家标准。二者都通过了 42 kV/1min 工频耐压试验, 符合 DL/T596-2021 规定。全绝缘管母线局部放电量 ≤ 5 pC, 半绝缘管母线 ≤ 8 pC, 均低于《高电压试验技术—局部放电测量》(GB/T 7354-2018) 规定的 ≤ 10 pC。绝缘电阻上, 25 °C 时全绝缘管母线 $\geq 5\ 000\ \text{M}\Omega$, 半绝缘管母线 $\geq 1\ 000\ \text{M}\Omega$, 远超行业最低要求。在短路耐受方面, 两者都能承受 4 s 时长 63 kA 短路电流冲击。在温升控制方面, 全绝缘管母线 $\leq 45\ \text{K}$, 半绝缘管母线 $\leq 50\ \text{K}$, 均符合《交流高压电器在长期工作时的发热》(GB/T 763-1990) 标准^[3]。总体而言, 全绝缘管母线绝缘性能更佳, 半绝缘管母线也能稳定运行。

在极端环境适应性上, 二者差异明显。高湿环境下, 相对湿度 95% 运行 30 天, 全绝缘管母线绝缘电阻衰减 45%, 半绝缘管母线仅下降 12%, 防潮性更好。海拔 2 000 m 时, 全绝缘管母线击穿电压下降 28%, 半绝缘管母线通过增大电气间隙维持绝缘性能。氙灯加速老化试验 1 000 小时后, 全绝缘管母线外护套开裂率 18%, 半绝缘管母线表面涂层完好率 96%, 耐候性更强。

在工程实施与运维管理上, 全绝缘管母线接头制作复杂, 需 4 小时, 半绝缘管母线仅需 1.5 小时。在密封工艺上, 全绝缘管母线采用双重密封, 半绝缘管母线用常规防水胶带即可。运维检测时, 全绝缘管母线需专用设备, 半绝缘管母线用红外热成像仪更便捷。故障定位时间, 全绝缘管母线 4~6 小时, 半绝缘管母线 1~2 小时。年维护成本, 全绝缘管母线 8.2 万元 / km, 半绝缘管母线 3.5 万元 / km, 半绝缘产品在偏远地区优势显著。

基于 35 kV/2 000 A、长度 100 m 的典型管母线系统全生命周期成本分析显示: 在初始投资阶段, 全绝缘方案约需 85 万元, 半绝缘方案仅需 62 万元, 后者较前者降低 27%; 在 10 年长期运维周期内, 全绝缘管母线维护成本累计约 82 万元, 半绝缘管母线仅需 35 万元, 维护成本降低 57%; 单次故障造成的发电量损失方面, 全绝缘方案约为 28 万元 / 次, 半绝缘方案则降至 15 万元 / 次, 故障经济损失减少 46%。

4 新能源电站管母线选型体系构建

新能源电站管母线选型需综合考虑环境、系统、管理三大核心影响因素。在环境因素方面, 海拔高度超过 1 000 m 时, 大气压力降低会导致空气绝缘强度下

降,需考虑对绝缘性能的影响;年平均相对湿度 $\geq 75\%$ 的地区属于高湿环境,长期水汽侵蚀易引发绝缘性能下降;年降雨量 $\geq 1\ 500\text{ mm}$ 区域需加强防水设计,防止雨水渗入引发故障;污秽等级达到III级及以上时,表面污秽物会降低绝缘水平,需增大爬电距离^[4]。在系统参数方面,35 kV 及以下电压等级推荐优先采用半绝缘方案,因其成本效益较高;额定电流 $\geq 4\ 000\text{ A}$ 时,大电流产生的热量显著增加,需重点评估母线温升控制;短路电流 $\geq 50\text{ kA}$ 时,强大的电动力可能破坏母线结构,需进行机械强度校核。在管理因素方面,全绝缘管母线施工需二级及以上专业资质队伍,对施工技术要求严格;技术力量薄弱的偏远电站更适合选择运维简便的半绝缘方案;成本预算有限的项目应优先考虑初始投资较低的半绝缘产品。

具体选型决策流程包含三个关键步骤:首先,采用多因子评分法对环境条件进行量化评估,其中海拔、湿度、污秽等级权重分别设定为30%、40%、30%,总分达到60分及以上判定为恶劣环境,该类环境优先选用半绝缘管母线并配合支柱绝缘子加密布置(跨距控制在 $\leq 6\text{ m}$),以增强绝缘可靠性;环境评分低于60分的优良环境可选用全绝缘管母线,但需严格把控接头工艺质量,避免因施工不当引发故障。然后,进行全生命周期成本核算,通过综合比较初始投资、运维成本、故障损失等费用,当半绝缘方案成本低于全绝缘方案80%时,无论环境条件如何均优先采用。最后,选型确定的管母线需通过1 000小时湿热循环试验和50次操作冲击试验,模拟实际运行中的极端工况,确保满足实际运行要求。

针对不同应用场景,推荐以下选型方案:沿海高湿环境光伏电站建议采用半绝缘管母线,需保证爬电比距 $\geq 31\text{ mm/kV}$,并配备IP55防护等级,防止盐雾、水汽侵蚀;高原干旱地区风电站同样适合半绝缘方案,考虑到高原低气压影响,电气间隙需在常规设计基础上每千米增加14%,补偿气压降低带来的绝缘性能损耗;内陆洁净环境光伏电站可选用全绝缘管母线,接头采用硅橡胶密封工艺,配合IP65防护等级,确保长期运行可靠性;城市分布式电站推荐全绝缘管母线,采用电缆沟敷设方式,并做好屏蔽层接地处理,降低电磁干扰对周边环境的影响。

5 选型方案实证验证

某光伏电站在经历两次绝缘故障后,对35 kV侧100 m全绝缘管母线实施改造,更换为半绝缘结构。具体改造措施包括:拆除原有复合绝缘层,保留导体铜管并在表面均匀涂刷0.8 mm厚耐候绝缘涂料,该涂料

具有优异的防潮、抗老化性能;三通接头采用银基钎焊工艺连接,确保对接间隙 $\leq 0.1\text{ mm}$,保障电气连接可靠性,外部采用热缩套管配合防水胶双重密封,增强防水性能;将支柱绝缘子间距由8 m缩短至5 m,使爬电比距提升至35 mm/kV,有效提升绝缘水平;同步安装在线监测装置,实现接头温度和绝缘电阻的实时监测,便于及时发现潜在故障隐患^[5]。改造后,设备经过12个月连续运行验证,未发生任何绝缘故障,关键性能指标表现优异:在交流耐压试验中顺利通过42 kV/1min测试,局部放电量稳定控制在 $\leq 7\text{ pC}$,满足运行要求;接头最高温升仅42 K,远低于50 K的标准限值,证明散热设计合理;在经历3次日降雨量 $\geq 50\text{ mm}$ 的暴雨天气后,绝缘电阻未出现明显下降,体现出良好的防潮性能;年维护成本从改造前的8.2万元降至3.1万元,投资回收期仅需1.8年,充分验证了半绝缘选型方案的工程可行性和经济效益。

6 结束语

全绝缘管母线在局部放电和绝缘电阻上表现出色,但在户外恶劣环境中可靠性欠佳,施工运维成本也高。半绝缘管母线经结构优化与防护改进,可满足新能源电站35 kV运行要求,全生命周期成本较全绝缘产品降低41%。选型可按“环境评估—技术匹配—经济核算—试验验证”四步走,恶劣环境优先半绝缘,洁净环境可选全绝缘。在应用方面,设计阶段,高湿高海拔地区强制用半绝缘,接头爬距按标准1.2倍设计;施工时,全绝缘管母接头由厂家专业人员安装,半绝缘接头采用钎焊工艺;运维建立“红外检测+绝缘电阻测试”双检制度,全绝缘每6个月检测一次,半绝缘每12个月检测一次。建议制定《新能源电站管型母线技术条件》,明确不同绝缘方式适用场景与工艺要求。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 电力设备预防性试验规程 (DL/T596-2021)[S]. 北京:中国电力出版社,2021.
- [2] 全国电力电缆标准化技术委员会. 局部放电测量 (GB/T7354-2018)[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [3] 全国高压开关设备标准化技术委员会 (SAC/TC 65). 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求:GB/T 11022-2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [4] 余佐文,马爱清,高大威. 基于多场耦合的35kV管型母线接触面发热分析[J]. 电瓷避雷器,2025(02):27-33.
- [5] 李党红. 某区域绝缘管型母线的现状分析与运维建议[J]. 电工技术,2024(16):171-174,177.