

管型母线对数据中心供电可靠性的影响研究

渠怀升, 褚运凯*

(山东鼎拓电气有限公司, 山东 济南 250100)

摘要 数据中心作为数字经济核心基础设施, 供电可靠性直接决定业务连续性与数据安全性。当前数据中心供电系统中, 传统母线存在载流能力不足、散热性能欠佳、故障发生率较高等问题, 制约供电可靠性提升。本文结合管型母线结构特性与数据中心供电需求, 系统探究管型母线在导电、散热、机械性能等方面对数据中心供电可靠性的影响, 明确管型母线选型、安装及运维的关键点, 提出适配数据中心的管型母线应用优化方案。研究证实, 管型母线可有效降低供电故障发生率, 提升供电连续性与稳定性。

关键词 管型母线; 数据中心; 供电可靠性; 载流能力; 运维优化

中图分类号: TM727

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.002

0 引言

数字经济快速发展推动数据中心规模持续扩大, 其承载的业务对供电连续性要求不断提高。当前多数数据中心仍采用传统矩形母线或电缆供电, 存在结构缺陷与性能短板, 难以适配高密度负载下的高可靠性供电需求^[1]。本文立足于管型母线技术特性, 通过系统研究管型母线对数据中心供电可靠性的影响路径, 明确其在提升供电稳定性、降低故障风险中的核心作用, 制定科学合理的应用策略, 填补管型母线在数据中心精准应用领域研究空白, 助力数据中心实现高可靠性供电目标。

1 管型母线相关理论和相关技术的发展

1.1 管型母线核心理论

管型母线核心理论围绕电流传输特性、散热机制及机械稳定性展开。其空心结构可形成自然对流风道, 降低集肤效应影响, 提升电流分布均匀性, 减少电能损耗。管型母线的导电性能取决于导体材质纯度与截面设计, 绝缘性能则由包覆材料特性与工艺决定, 机械强度依赖管材壁厚与加工精度。在理论层面, 管型母线通过优化导体结构, 实现载流能力与散热性能的协同提升, 适配高负载、高稳定性供电场景, 其电气性能与机械性能均优于传统母线结构^[2], 为数据中心高可靠性供电提供理论支撑。

1.2 管型母线技术发展现状

管型母线技术核心技术聚焦材质优化与结构创新。目前行业内主流管型母线采用 6063G 铝镁合金、T2 电解

铜等材质, 其中 T2 电解铜导电率 $\geq 98\%$ IACS, 6063G 铝镁合金导热系数达 $0.5 \text{ cal}/(\text{℃} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})$ 。绝缘管型母线采用聚四氟乙烯包覆工艺, 绝缘电阻 $> 10\,000 \text{ M}\Omega/10 \text{ m}$, 可适配 35 kV 及以下电压等级。技术发展呈现智能化、小型化趋势, 智能监测型管型母线已实现温度、电流实时监测^[3], 其应用场景从传统变电站延伸至数据中心、轨道交通等领域, 技术成熟度与适配性持续提升。

1.3 数据中心供电可靠性核心理论

数据中心供电可靠性核心理论涵盖供电系统拓扑设计、设备性能适配、故障防控等方面。其可靠性评价依托平均无故障时间 (Mean Time Between Failures) 平均修复时间 (Mean Time To Repair) 供电可靠率等指标开展。第四等级 (Tier IV) 数据中心设定供电可靠率 $\geq 99.999\%$ 的运行标准^[4]。供电系统要通过冗余设计应对设备故障电网波动等运行风险。传统母线载流密度偏低, 故障节点较多, 无法适配高密度负载的可靠性标准^[5]。管型母线依托结构与性能特质契合数据中心供电系统稳定高效运行的核心诉求。

2 管型母线结构特性与数据中心供电适配性分析

2.1 管型母线结构参数与导电性能

管型母线的结构参数主要包括截面尺寸、壁厚、材质及绝缘层厚度。常用管型母线截面范围为 $\phi 50 \sim \phi 150 \text{ mm}$, 壁厚 $5 \sim 12 \text{ mm}$, 其中铜质管型母线电阻率为 $0.0184 \text{ }\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 铝质管型母线电阻率为 $0.031 \text{ }\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。在相同截面下, 管型母线载流能力较矩形母线提升 $30\% \sim 40\%$, 其中 6300 A 规格管型母线长期允许载流

作者简介: 渠怀升 (1980-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 管型母线的研发、设计、制造、生产。

*通信作者: 褚运凯 (1986-), 男, 本科, 研究方向: 管型母线的市场分析、规划。E-mail: 1033998416@qq.com

量达 2.0 A/mm^2 。数据中心高密度负载场景中，管型母线可有效减少电流传输损耗，降低电压降，确保供电电压稳定在 $\pm 2\%$ 误差范围内，适配服务器^[6]、交换机等核心设备的供电需求。

2.2 管型母线散热特性与数据中心供电稳定性

管型母线的散热特性是影响数据中心供电稳定性的关键因素，表 1 为不同类型母线散热性能对比数据，明确管型母线的散热优势。由表 1 可知，铜质管型母线导热系数为 $0.92 \text{ cal}/(\text{℃} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})$ ，3 150 A 额定电流下温升为 48 K，散热效率 89%。铝质管型母线导热系数为 $0.50 \text{ cal}/(\text{℃} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})$ ，温升 55 K，散热效率 82%。矩形铜母线导热系数与铜质管型母线一致，温升 62 K，散热效率 75%。电力电缆导热系数仅 $0.28 \text{ cal}/(\text{℃} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})$ ，温升 78 K，散热效率 63%。管型母线在温升控制与散热效率上均优于矩形铜母线和电力电缆，可满足数据中心高负载运行需求。

表 1 不同类型母线散热性能对比表

母线类型	导热系数 (cal/ (℃·cm·s))	额定电流 3 150 A 时温升 (K)	散热效率 (%)
铜质管型母线	0.92	48	89
铝质管型母线	0.50	55	82
矩形铜母线	0.92	62	75
电力电缆	0.28	78	63

2.3 管型母线机械特性与数据中心安装适配性

数据中心机房空间紧凑，设备安装密度高，对母线机械强度与安装灵活性要求严格。管型母线机械性能突出，允许应力为矩形母线的 4 倍，铜质管型母线抗拉强度 $\geq 205 \text{ MPa}$ ，铝质管型母线抗拉强度 $\geq 110 \text{ MPa}$ ，可适配 6 ~ 13 m 跨距支撑，减少支架布设，节约机房空间。模块化构造搭配 T 型接头、角度调节器实现三维布设，适配机房复杂管线布局^[7]。抗震性能可承受 0.25 g 水平地震分量，防护等级达 IP68，阻隔灰尘与湿气侵扰，降低运行故障概率。

3 管型母线对数据中心供电可靠性的影响机制

3.1 管型母线对供电连续性的影响

供电连续性是数据中心供电可靠性的核心指标，管型母线通过优化结构设计，有效降低故障发生率，提升供电连续性。管型母线空心结构减少集肤效应，电流分布均匀，避免局部电流过大导致的接头过热、绝缘老化等故障^[8]，其故障发生率仅为矩形母线的 15%。数据中心采用管型母线后，供电中断次数可从

传统母线的 0.90 次 / 户 · 年降至 0.14 次 / 户 · 年，下降 84.4%，依据为全国平均用户停电频率 0.90 次 / 户 · 年，管型母线应用后实测数据 0.14 次 / 户 · 年。同时，管型母线接头采用镀银处理，接触电阻 $\leq 0.01 \text{ } \Omega$ ，减少接头发热故障，进一步保障供电连续性，适配数据中心 24 小时不间断供电需求。

3.2 管型母线对供电质量的影响

供电质量直接影响数据中心核心设备运行稳定性，管型母线与矩形母线在数据中心应用中的供电质量参数对比，明确其影响效果，如表 2 所示。

表 2 不同类型母线供电质量参数对比表

母线类型	电压降 (%)	谐波畸变率 (%)	电能损耗 (kW/km)
铜质管型母线	1.2	2.1	12.8
铝质管型母线	1.8	2.3	18.5
矩形铜母线	2.5	3.8	19.6

分析表 2 可知，铜质管型母线电压降为 1.2%，谐波畸变率为 2.1%，电能损耗为 12.8 kW/km。铝质管型母线电压降为 1.8%，谐波畸变率为 2.3%，电能损耗为 18.5 kW/km。矩形铜母线电压降为 2.5%，谐波畸变率为 3.8%，电能损耗为 19.6 kW/km。铜质管型母线电压降满足数据中心供电控制要求，谐波抑制效果突出，电能损耗控制水平最优。铝质管型母线各项参数均优于矩形铜母线，管型母线可从多维度优化供电质量，保障供电系统稳定运行。

3.3 管型母线对供电系统冗余性的提升

数据中心供电系统需具备充足冗余能力应对设备故障与电网波动。管型母线借助冗余设计强化供电系统性能。管型母线适配 2N、N+1 冗余拓扑结构，可与 UPS 柴油发电机等备用电源无缝衔接，故障切换时间 $\leq 50 \text{ ms}$ ，保障核心负载不间断供电。模块化构造可配合负载增长增设母线回路，无需大幅改造现有供电系统^[9]。管型母线供电系统冗余可靠性较传统母线提升 40%，传统母线冗余系统切换成功率 85%，管型母线可达 99%。4 s 热稳定电流 100 kA，动稳定电流峰值 250 kA，较强抗短路能力可削弱故障冲击。

3.4 管型母线对供电系统运维效率的影响

供电系统运维效率直接决定数据中心供电故障处置时效与长期运行稳定性。管型母线一体化绝缘结构缩减现场接头布设数量，接头总量较矩形母线降低 65%，弱化接头故障引发的运维压力。管型母线绝缘性能稳定，绝缘电阻维持 $10\ 000 \text{ M}\Omega/10 \text{ m}$ 标准，检测流程

无需反复调试设备参数。防护等级 IP68 的结构设计阻隔机房粉尘与湿气侵入,降低环境因素导致的故障概率。数据中心运维周期可由月度检测调整为季度检测,单次故障排查时长缩短 40%。管型母线全生命周期维护频次下降 70%,运维人力与物资投入降低 35%。稳定的电气与机械性能简化运维操作流程,缩短故障修复时长,让数据中心供电系统维持高效运维状态,为供电可靠性提升筑牢运维基础。

4 管型母线在数据中心的优化应用策略

4.1 管型母线选型原则与参数匹配

管型母线选型需结合数据中心负载特性、电压等级与机房环境,遵循“载流适配、性能匹配、经济合理”的原则。在电压等级方面,数据中心低压配电系统(0.4 kV)可选用铝质管型母线,中压配电系统(10~35 kV)优先选用铜质管型母线。载流量匹配需预留 30% 扩容空间,Tier IV 级数据中心核心回路选用 6 300 A 规格管型母线,普通回路选用 2 500~4 000 A 规格。在材质选型上,潮湿、高盐雾环境选用防腐型管型母线,常规机房选用普通铜、铝质管型母线^[10]。截面尺寸需根据载流量计算确定,3 150 A 及以下规格管型母线长期允许载流量 $\leq 2.68 \text{ A/mm}^2$,4 000 A 及以上规格 $\leq 2.0 \text{ A/mm}^2$,确保选型参数与数据中心供电需求精准匹配。

4.2 管型母线安装工艺优化

安装工艺直接影响管型母线运行稳定性,需结合数据中心机房特点优化安装流程,控制安装误差。管型母线不同安装方式的可靠性参数对比,为安装工艺优化提供依据,如表 3 所示。

表 3 管型母线不同安装方式可靠性参数对比表

安装方式	支架间距 (m)	水平度偏差 (mm/10 m)	故障发生率 (次/年·km)
架空安装	6~8	≤ 5	0.08
支架安装	3~5	≤ 3	0.05
垂直安装	8~10	≤ 4	0.06

由表 3 可知,支架安装水平度偏差 $\leq 3 \text{ mm/10 m}$,故障发生率 0.05 次/年·km,安装精度与运行稳定性最优。架空安装支架间距 6~8 m,故障发生率 0.08 次/年·km。垂直安装支架间距 8~10 m,水平度偏差 $\leq 4 \text{ mm/10 m}$,故障发生率 0.06 次/年·km。现场施工需管控接头紧固力矩 78 N·m,涂刷专用导电膏,控制接触电阻 $\leq 0.01 \Omega$,防火墙穿越位置采用 A 级防火封堵,保障整体安装质量。

4.3 管型母线运维策略与可靠性保障

科学的运维策略可延长管型母线使用寿命,提升供电可靠性,需建立三级运维机制。每季度采用 2 500 V 兆欧表检测绝缘电阻,确保阻值 $> 10\,000 \text{ M}\Omega/10 \text{ m}$,不符合标准的及时更换绝缘层。年度大修采用超声波局放检测技术,捕捉 $> 5 \text{ pC}$ 的放电信号,提前排查绝缘隐患。同时,建立运维台账,记录母线运行参数、故障情况及维护记录,结合数据中心负载变化,及时调整运维方案。针对不同材质母线制定差异化运维策略,铜质母线每 2 年进行一次防腐处理,铝质母线每年检查一次氧化层,确保管型母线长期稳定运行。

5 结束语

本文围绕管型母线对数据中心供电可靠性的影响开展系统探究,弥补传统母线难以匹配数据中心高负载高可靠供电的缺陷,阐释管型母线在 ρ 导电 λ 散热机械强度层面的优势及对供电可靠性的作用机理,制定适配数据中心的选型安装运维优化方案。成果可提升数据中心供电稳定程度,降低供电故障概率,为供电系统升级提供技术支撑。探究内容未涉及极端环境下管型母线运行特性,也未结合超大型数据中心需求开展细化研究。后续将聚焦极端环境适配技术,推动管型母线与智能监测系统整合,提升其应用效能。

参考文献:

- [1] 纪中锐.数据中心供配电架构系统的分析[J].集成电路应用,2021,38(01):162-163.
- [2] 孙丰睿.绝缘管型母线缺陷诊断及电气性能提升研究[D].淄博:山东理工大学,2025.
- [3] 李金明,李金海.绝缘管型母线的结构及现场施工[J].水泥技术,2023(01):74-78.
- [4] 易龙强.数据中心不间断供电构架可靠性研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2024,42(02):41-48.
- [5] 郑自琴.管型母线运行温度偏高原因分析及处理[J].福建水力发电,2021(02):35-39.
- [6] 张瑜,吴红飞,李泽伟,等.面向数据中心 48 V 供电系统的混合型母线变换器及其高密度集成[J].中国电机工程学报,2024,44(16):6578-6587.
- [7] 毛文磊.数据中心的柔性直流供电系统协调控制研究及系统设计[D].佛山:佛山科学技术学院,2022.
- [8] 郝越峰,马春雷,陆禹初.全绝缘管型母线缺陷分析及改进措施[J].高压电器,2020,56(11):84-89.
- [9] 杨朝.管形母线在铁路牵引变电所的应用[J].科技创新导报,2020,17(03):58,60.
- [10] 史名.密集绝缘型母线槽在工厂供电中的应用研究[J].农村电气化,2022(09):74-77.