

建筑与景观直流配电系统设计与应用研究

——以绍兴植物园项目为例

陈 朕

杭州园林设计院股份有限公司 浙江 杭州 310000

摘 要：在倡导绿色、环保、低碳的目标引领下，绿色建筑与智慧景观的发展对能源系统提出了更高要求。直流配电系统因其高效、可再生能源、设计框架简洁等特点，正在建筑与景观领域逐步推广。本次以绍兴植物园项目为对象，探讨直流配电系统关键技术在建筑与景观中的实践应用。项目实施聚焦交直流协同、分布式电源整合、复杂场景适配等关键问题，通过优化接地系统、引入智能管理模块及多专业协同机制，实现能效提升与安全保障的平衡，为同类绿色建筑项目提供技术参考。

关键词：绿色建筑；直流配电系统；交直流混合供配电；景观照明

引言

随着建筑节能与可再生能源应用需求的提升，直流配电系统因其高效适配光伏、储能等分布式电源的特性，在绿色建筑领域展现出显著优势^[1]。传统交流系统在长距离传输损耗、多电源并网兼容性等方面存在局限，而直流配电系统因其在电能转换路径短、功率控制精度高及易于接入光伏等分布式能源的特点，可有效降低线路损耗、提升可再生能源利用率。绍兴植物园项目作为集温室展览、运动休闲、科研于一体的综合性公园，利用当地现有直流供电条件，对项目的供配电系统的能效、安全性及场景适配性提供了条件。本研究结合项目功能分区特点，构建交直流混合供配电架构，重点分析直流系统在室外景观照明、景观动力及直流建筑差异化场景中的应用策略，探讨多系统协同运行、复杂环境适配等技术难点的解决路径，为直流配电在大型公共建筑中的推广提供实践依据。

1 直流配电系统设计框架

1.1 供配电系统架构

绍兴植物园项目供配电系统架构遵循“分区供电、能效优先”原则，将温室、商业综合体等核心建筑划分为交流供电区域，采用双路10kV独立电源保障消防及重要负荷；室外景观、充电桩及小型单体建筑则纳入直流供电网络，形成“交流保障核心、直流覆盖外围”的互补格局^[2]。绍兴植物园项目直流配电系统拓扑及实物联络图如下图1所示，图中减少用电区域和变配电设施的数量。

系统配置上，设置1座直流高压开关站、4座室外直流配电房，搭配光伏系统与储能装置形成分布式电源网络。光伏组件覆盖三处停车场雨棚屋面，总面积约3000

平方米，所发电量通过直流母线接入配电房，结合储能系统实现“自发自用、余电存储”的柔性调节。

直流能源中心：系统主要由上级直流高压系统、新建光伏阵列、磷酸铁锂储能系统及直流汇流装置构成。光伏发电与储能在DC母线侧耦合，通过DC/DC变换器调节输出。

主干直流母线（DC750V/DC220V）：覆盖园区主通道及主要景观节点，通过DC配电箱延伸至各类终端负载。

主要直流负载终端：包括LED照明、景观水泵、小型直流风机、信息发布屏等直流负载，额定电压主要为DC48V及DC24V，部分电机类设备采用220V直流供电。

本次配电系统架构具有布线简洁、损耗低、易于分区调控等优势，有效匹配植物园内“分布广、负载小而多样”的用能特点。



图1 绍兴植物园项目直流配电系统框架

1.2 设备选型与线路敷设

绍兴植物园项目直流配电系统的设备选型与线路敷设紧密围绕场景需求展开，兼顾能效、安全性与场景适配性。直流配电房配置800-1250kVA变压器，负载率控制在60%-75%，平衡近期能效与远期扩容需求。室外停车

场部署120kW双枪直流快充桩,采用高功率适配分布式密度布局,单桩电缆截面经负荷计算优化以降低压降。考虑到户外环境复杂性与负载敏感性,室外直流系统采用DC断路器与带DC故障定位功能的IP65等级防护型配电箱;照明类负载集中采用恒流型直流驱动器,以保证长距离输电下照明电压的稳定性。

线路敷设采用分区放射式结构,采用DC750V/DC220V/DC48V分级电压体系:DC750V/DC220V主干线:穿HDPE管埋地敷设,过机动车道时以镀锌钢管强化防护,降低长距离传输损耗。DC48V/DC24V支线:通过多模块分区供电,单模块覆盖半径 ≤ 30 米(依据国标图集04DX101-1P3-11计算),确保末端电压波动 $\leq 10\%$ 。全园配电干线设有故障电弧检测模块和接地监测系统,确保系统在高湿、强光等自然条件下稳定运行。同时接地系统采用IT制式,有效隔离交流系统干扰,提升直流网络抗电磁兼容性能。

2 直流配电系统在建筑与景观中的应用实践

2.1 室外景观场景应用

绍兴植物园项目的室外景观场景中,直流配电系统以高效节能为导向,构建多层次照明与动力供给体系。在园区室外景观配电设计中,涉及的LED庭院灯、LED草坪灯、投光灯、水下灯等直流照明、水泵设备,室外设备采用DC220V/DC24V电压等级,其中由于现状市场末端直流设备成品较少,针对DC220V的配电选型,有利部分交流照明设备根据直流电压等级作局部调整或直接适配,大大增加了末端设备的可选性。

相对传统交流照明系统存在转换效率低、调光响应慢、布线复杂等问题,直流照明系统则提供了更优的解决方案。本项目采用直流恒流供电方式,通过集中DC配电箱向各照明区域供电,直流照明系统可实现智能调光控制:引入DALI总线与光照传感器联动,实现“随光而动”的照度控制策略,可根据时间及人流密度自动调节亮度,实现能耗动态管理。同时直流照明系统省去传统AC/DC变换器,大幅降低设备损耗与热量积聚,提升整体能效10%以上。

室外停车场的直流快充网络是景观场景的重要组成部分。室外40个120kW(双枪)充电桩各分布在四个停车场设置,采用放射式配电结构从就近直流配电房取电,直流单桩电缆截面经负荷计算优化,减少线路压降损耗。充电桩布局与园区交通流线协同设计,结合光伏雨棚形成“光储充”一体化单元,夏季光伏峰值发电量可满足部分充电负荷,有效降低对传统电网的依赖。

2.2 建筑直流配电应用

在绍兴植物园项目的建筑直流配电应用中,系统针对不同功能建筑的用电特性进行差异化设计,实现能源高效利用与精准控制。科研中心作为园区的核心办公与实验场所,其直流配电系统以稳定性为首要目标,配置独立的直流配电柜,为办公区域提供DC220V通用电源,为精密仪器提供DC48V电源,避免交流供电可能产生的电磁干扰,保障科研设备数据采集的准确性。办公区域的照明与插座系统采用分区控制策略,通过直流母线动态调配负荷,并集成人体感应装置实现光照强度自动调节,经实测较传统交流系统节能约15%^[5]。

小型单体建筑如百草馆、驿站公厕等,采用模块化直流配电方案。以百草馆为例,其弧线造型建筑内部设置DC220V/DC48V照明与插座系统,灯具采用嵌入式LED筒灯,结合智能照明控制平台实现分区调光、时段控制与场景切换功能。驿站公厕的直流配电网络采用多模块分区供电模式,直流照明控制器具备热插拔与模块替换功能,各模块独立运行,当单个模块发生故障时不影响其他区域供电,显著提升了系统的容错能力与维护便利性。空调设备为建筑主要用电负荷,本项目空调设备与厂商定制,采用直流空调产品,该类设备在低负载、低噪音条件下保持高效率运行,特别适用于办公室和展厅区域。据厂商实验提供数据,使用直流风机后,单位冷负荷下系统能耗降低约15%。

3 项目实施重点、难点及解决方式

3.1 直流电压等级的选取

项目依据国标《中低压直流配电网电压导则》(GB/T35727-2017)、《民用建筑低压直流配电设计导则》T/CABEE 030-2022规定的参考电压等级情况:直流标称电压110V至3kV范围内,低压直流配电系统的标称电压宜从采用DC750V/DC375V/DC110V中选取。本项目根据用电传输范围及末端用电设备对应电压等级的要求,直流配电两级电压调整为DC750/220V,有利于远距离传输且满足末端设备的电压需求,充电桩、空调室外机采用DC750V设备,照明灯、办公设备采用DC220V设备,对于照明、家电设备等小容量负荷的供电能力,与采用AC220V基本相当。从而形成DC750V(主干)→DC220V(中压)→DC48V/DC24V(终端)的直流配电构架。

3.2 低压直流保护器选型

根据国标《电流对人和家畜的效应第1部分:通用部分》GB/T 13870.1-2022的要求,剩余电流保护器(RCD)在配电系统对保护人身安全、防止电气火灾和设备损坏其他主要作用,而在低压直流中直流RCD保

护电器还为空白，本项目中为提高直流配电的安全可靠性，选用一种利用霍尔传感器直流电流采样，使用直流绝缘巡检仪监测绝缘功能外，同时具备过压、过流、欠压等多种保护功能。在环境监控模块终端实时采集节点泄露电流幅值信息，配合接触器后端算法对剩余电流进行检测并控制断路器排除故障。

3.3 接地系统

项目由于采用直流IT接地与交流TN-S接地方式不同，易产生电位差或故障电流干扰，引发设备故障。电能质量不兼容，直流系统低谐波与交流动力设备高谐波负荷交叉时，可能导致电压波动。本次项目中采用独立接地设计，直流IT接地与交流TN-S接地极间距大于10米。

3.4 分布式电源与储能系统整合

光伏出力受天气影响大，直流母线电压稳定性不足，影响充电桩、景观动力等设备运行。

光伏、储能、市电多电源并网时，可能引发环流或孤岛效应，威胁系统稳定性。本项目为保证光伏及储能系统的可靠性，光伏组件集中布置于车棚顶面无遮挡区域，采用最大功率点跟踪（MPPT）技术，通过DC/DC变换器稳定直流母线电压。同时建立“光伏优先、储能调节、市电备份”逻辑智能能量管理系统，通过电池管理系统（BMS）监测电池状态，控制充放电深度放电及储能能力。同时设置低压防孤岛保护装置，建立非计划持续孤岛运行的继电保护措施，当电网故障时自动切断非关键负荷，保障重要负荷供电。

4 效益评估与优化策略

绍兴植物园项目在建设过程中，直流配电系统的引入并非简单替代传统交流系统，而是基于多场景、分布式、绿色低碳的目标进行系统化布局。在此过程中，技术融合、系统适配及项目落地过程中的难点成为关键挑战。

（1）效益经济性分析：与传统交流系统相比，直流配电系统初始投资略高，需配备DC-DC转换器、储能系统等附加装置，设备采购成本有所增加；部分设备需定制（如直流水泵、空调、灯具等）采购周期长。但从全生命周期看，直流系统具有更强的经济性，可减少电能

转换环节，提升系统效率约8%-15%；运维周期延长，维护费用降低约30%；灯具、风机等直流负载寿命延长10%-20%；同时可再生能源接入后，减少外购电成本。

（2）系统后期优化策略：结合设计现阶段的经验与存在的问题，提出以下优化方向：进一步优化协调与储能系统融合，通过储能系统动态调节输出，实现电压平衡与负载调配；推进标准化与产品化路径，加强与设备厂商协同研发，推动直流照明、风机、水泵产品的标准化生产。

结论

本文以绍兴植物园项目为例，系统构建“交流保障核心、直流覆盖外围”的交直流混合配电体系，通过直流分级电压与分布式能源协同，实现能效提升与安全平衡。本项目直流配电系统作为绿色建筑与景观工程融合的示范项目，在规划设计、设备选型、运行策略等多个方面进行了创新性探索，形成了可复制、可推广的系统建设经验。

参考文献

- [1]刘伟.建筑低压直流配电系统设计分析[J].绿色建造与智能建筑,2025(01):133-135.
- [2]陈鹏伟,阮新波,陈新,等.“直流配电系统分析与控制”课程建设[J].电气电子教学学报.2023,(5):50-52
- [3]郭宇峰.浅谈打造供电所文化景观实施方案[J].农电管理,2020,(08):67-68.
- [4]董维娜,王宁.基于无线供电的LED水下景观灯设计[J].中国照明电器,2020,(06):9-15.
- [5]建筑直流配电系统的能量管理系统及其应用[J].赵宇明;郭佩乾;刘国伟;袁志昌;史梓男.南方电网技术,2021(05):20-28
- [6]王瑞峰,米根锁.霍尔传感器在直流电流检测中的应用仪器仪表学报,2006.06第27卷6期
- [7]常潇;郭伟东;李胜文;刘翼肇;杨洋;基于改进随机森林算法的中低压直流配电网剩余电流保护方法 电子器件 2024年第6期