

PLC 控制的太阳能灯塔供电系统设计与优化

周孟瑜 苏英钦

浙江康阳机械有限公司 浙江衢州 324000

摘要：太阳能灯塔将无穷尽的辐射能转换为可调度的电能，并通过储能缓冲使其在离线状态下持续产生高强度的光束，已成为赛事、矿山和灾难应急等必备光源。可编程控制器实时对比光伏端电压、电量和负载电流，实现日照高峰时快速拉低阵列运行点，在阴雨天提前压缩放电深度，保证能量链始终处于安全曲线之上，为灯塔注入“自思考”能力。同时引入数字孪生技术，构建灯塔供电系统虚拟映射模型，实现物理实体与虚拟模型的实时数据交互，为系统设计优化、运维管控提供全生命周期支撑。

关键词：PLC 控制；太阳能；灯塔供电；系统设计优化

引言

可编程控制器并不是单纯地代替继电器，它将“发电—储能—用电”三个阶段的过程抽象成一个连续状态，并采用 PID 和模糊规则迭加的方式，实现电力路径的灵活调度。在最大功率点锁定之后，剩余的能量按照温度梯度分布到蓄电池和逆变支路上；当灯在夜间启动时，控制器会通过软启动来抑制浪涌，然后根据束流的角度逐步提高占空比，防止蓄电池电压崩溃。当云层突然出现时，系统可以毫秒级切换到限流模式，而无需断开负载，使光照衰减曲线变平，保证现场工作节奏的零感知。可见，未来灯塔将不再是一道单独的光柱，而是一种可联网、可集群的能量节点，它的每一次迭代，都将成为“零碳光储”的最直观体现。

1 太阳能灯塔供电系统核心构成与工作原理

1.1 系统整体架构

利用 PLC 对太阳能灯塔供电进行控制，采用“能量收集—蓄能—控制—输出—保障”的五层结构设计。能量收集层选用高效率的 435W 单晶硅太阳能电池板，光电转化效率 $\geq 23.5\%$ ，表面涂有防反射涂层和 3.2mm 超白钢化玻璃，具有良好的耐候性和耐冲击性，能适应复杂的室外环境。配有水平角 $\pm 180^\circ$ 和 $0\sim 90^\circ$ 的双轴旋转机构，可实现全天时跟踪。

储能层采用 8 个 12V 胶体蓄电池，具有深度放电（深度 $\geq 80\%$ ）和长循环（ ≥ 1500 次）的特点，蓄电池组内置隔热层和温控装置，可在 -20°C -60°C 环境下保持稳定的储能特性^[1]。控制核心部分采用西门子 S7-200SMART

PLC 作为主控制单元，配以汇能精电的 IT 系列太阳能控制器，并将光强、风速、电压、电流等传感器进行集成，实现对环境参数和系统运行参数的实时采集，并进行逻辑运算和指令执行。

负载输出层包括一个照明负载（4~6 个 150W 的 LED 高亮度灯具）和一个辅助负载接口，它可以用正弦波逆变器把直流电转换成 220V/50Hz 的交流电，支持 1000W 以下的充电器，吹风机等。在辅助保障层增加 65A 的智能工频充电装置，以应对多雨天气下的电力互补充电，并配有故障诊断和报警模块，保证系统的连续、可靠运行。

1.2 核心工作原理

系统的工作流程分为白天蓄能、夜间照明和特殊工况保障三个阶段，通过 PLC 实现整个闭环控制。在白天，PLC 与预先存储的阳光轨迹数据和强度传感器相结合，驱动步进电机驱动太阳能电池板旋转，利用“程序粗定位”获得太阳方位角和高度角，实现快速追光。然后利用四象限强度传感器检测出不同强度的光强差，实现 $\pm 0.5^\circ$ 的微调，保证太阳直接照射在平板上，使光电转换效率最大化。汇能精电控制器将从太阳能电池板输出的直流电压稳定在 28.8V，并由 PLC 实时监控电池的电压和电流，防止过充和过放电。

在夜晚或者光照强度低于 20000lux 的情况下，PLC 切换到放电模式：蓄电池经控制器对发光二极管负载提供电力，并根据周围环境的亮度自动调整灯的功率（50~100%）；逆变电源同步起动，保证用电稳定，输出电压精度 $\pm 2\%$ ，谐波失真 $\leq 3\%$ ^[2]。当电池电量低于额定容量的 25% 时，

PLC 会触发低电量警告, 用电优先断开, 照明功率降低到 50%, 延长核心供电时间。

在下雨的时候, PLC 会根据光照传感器和天气预报的数据, 预先判断出电源的缺口, 它会自动激活辅助充电器, 将其接入市电。采用恒流 - 恒压 - 浮充三段方式进行充电, 在蓄电池电量 $\geq 80\%$ 的情况下, 停止供电, 实现对能量的利用和成本的控制。当风速大于 10m/s 时, PLC 启动抗风保护逻辑, 使太阳能电池板恢复到水平状态, 从而避免设备的损坏。

2 PLC 控制模块设计与优化

2.1 PLC 硬件选型与接口配置

光强传感器 (精度 $\pm 1\%$), 风速传感器 (量程 $0\sim 30\text{米/秒}$), 经模拟量接口与 PLC 相连, 信号传递误差不超过 0.5% ; 汇能精电控制器采用 RS485 接口和 PLC 进行双向通信, 实现充电和放电参数的交互和控制命令的传送, 通信速率为 9600bps , 误码率 ≤ 10 。步进电动机驱动装置接收 PLC 的指令脉冲输出接口, 控制太阳能电池板的旋转精度达到 0.1° [3]。该触摸屏通过以太网接口与可编程控制器相连, 可实时显示系统的工作参数, 如太阳能板的电量, 电池的电量, 负荷状态等, 并支持参数设定和故障查询。

2.2 双模式追光控制算法优化

针对传统的单模式追光法精度不高或者抗干扰能力差的缺点, 提出“程序粗定位 + 传感器精修正”的双模追光法。PLC 预先存储不同纬度和季节的太阳运动轨迹数据库, 根据当地的经纬度和实时时间, 利用查找表快速求出太阳方位角和高度角, 驱动步进电机实现太阳能电池板的粗定位, 避免繁琐的三角函数计算, 响应时间 $\leq 0.3\text{秒}$ 。

2.3 智能充放电控制策略

可编程控制器和汇能精电控制器协同工作, 实现三级充电和动态放电的控制。充电阶段: 在电池电压 $\leq 22\text{V}$ 的情况下, 进行恒流充电; 当电压达到 26.8V 时, 改为恒压充电方式, 以保持电压稳定, 防止电池失水。当电压达到 28.8V , 充电电流 $\leq 2\text{A}$ 的情况下, 切换到悬浮充电模式 (电压为 27.2V), 对电池的自放电进行补偿, 从而延长电池的使用寿命。采用 PLC 对电池温度进行实时监控, 在温度 $\geq 45^\circ\text{C}$ 时, 自动将充电电流降至 10A , 有效防止电池热失控。

3 系统关键模块设计与参数优化

3.1 能源采集与储能模块优化

采用高强度铝合金支架安装太阳能板, 基础采用 C30

混凝土独立支座 (尺寸 $800\text{mm} \times 800\text{mm} \times 600\text{mm}$), 地脚螺栓 M20, 抗风等级 ≥ 14 , 抗震烈度 ≤ 8 度。通过 Solidworks 对支架进行拓扑优化设计: 以 6061 铝合金为材料, 在满足抗风等级 ≥ 14 级、抗震烈度 ≤ 8 度的前提下, 减少支架非承重区域材料用量, 使整体重量降低 15% , 同时保留关键部位的加强筋结构 (厚度 8mm); 借助 Solidworks Simulation 模块开展模态分析, 确定支架固有频率为 28Hz , 避开风速引起的共振频率区间, 防止长期共振导致结构疲劳损坏。在此基础上, 选用新型的 435W 太阳能电池板最大功率跟踪方法 (MPPT), 通过引入导纳增量法, 实现对最大功率点的跟踪, 且不受光照、温度等因素的影响, 稳定状态误差 $\leq 0.5\%$, 比传统的扰动观测方法提高 $12\%\sim 15\%$ 。

储能电池采用免维护胶态电池, 内置 AGM 隔离层, 高纯硫酸电解质, 具有极佳的低温启动和耐硫化性能。通过 Solidworks 对电瓶箱进行结构设计, 优化内部通风通道布局: 设计 3 条宽 50mm 的纵向风道, 配合顶部 2 台直径 80mm 的轴流风机安装位, 确保空气流速 $\geq 1.2\text{m/s}$, 快速带走电池运行产生的热量; 同时建模时预留传感器安装槽, 方便温度、电压传感器精准固定, 为数字孪生模型提供实时数据输入, 采用基于充放电循环次数和容量衰减速率的健康度评估模型, 在 $\text{SOH} \leq 70\%$ 时触发维修预警。电瓶箱配有通风冷却系统, 当温度 $\geq 40^\circ\text{C}$ 时, 自动开启风机, 保证储存的稳定性。

3.2 负载输出模块适配设计

光源选择 150WLED 光源, 光效 $\geq 170\text{lm/W}$, 显色指数 ≥ 88 , 采用具有 IP67 保护设计的鳍片式散热结构, 寿命 ≥ 5 万小时。PLC 采用 PWM 方式对灯具的亮度进行调整, 支持 $0\sim 100\%$ 的无级调光, 满足不同场合的照明需要。煤矿井下作业采用 4 个照明分区控制, 严格保障重点部位照度不低于 1500lx 、非重点部位照度不低于 500lx , 在满足井下高强度照明需求的同时, 通过分区调光实现节能降耗的目标。

辅助负载接口采用正弦波型逆变器, 额定功率 1500W , 转换效率 $\geq 92\%$ 。接口采用防水防尘插座 (保护等级为 IP65), 并配有漏电保护装置。支持充电器, 吹风机, 小工具等设备的电源供应, 能满足野外的临时需要, PLC 对辅助负荷电流进行实时监控, 当电流大于 4.5A 时, 可自动限流, 防止逆变器过载 [6]。

3.3 辅助保障与故障诊断模块

辅助充电模块选择的是一款 65A 的智能型工频充电器,

它的输入电压为 $220V \pm 10\%$ ，输出电压为 $24V-28.8V$ 。它可以和 PLC 连接，实现自动启停功能。PLC 利用光照传感器和 24 小时的天气预报数据，预测雨天电力缺口，提前启动辅助充电，当电池电量 $\geq 80\%$ ，或天气晴朗时，系统自动断电，转换为太阳能，达到最大限度的利用能量。

采用可编程控制器和传感器网络相结合的方法，实现太阳能板开路 / 短路，电池过充 / 过放电，逆变器过载，电机卡阻等 15 种常见故障增加。当出现故障时，PLC 会立即切断故障模块的电源，并将其切换到待机状态（如单光灯、蓄电池优先），并在触摸屏上显示故障码和处理意见；支持 RS485 远程通信接口，可以向监控平台推送故障信息，方便远程维护，并缩短故障诊断时间。

4 系统安装调试与性能测试

4.1 安装与调试要点

安装于灯塔底部的 PLC 控制柜，按照“下强电、上弱电”原则，规划断路器、接触器等强电元件区域和 PLC、模拟量模块等弱电元件区域，元件间距预留 $\geq 30mm$ ，确保散热和维修操作空间；同时设计可拆卸式背板（厚度 $3mm$ 冷轧钢板），并在 Solidworks 中标注所有元器件的安装孔位坐标，现场安装时直接对照坐标钻孔，大幅提升安装效率。调试分为模块调试和系统联调两部分：模块调试阶段，分别对太阳能电池板的光电转换效率、PLC 控制精度（指令执行延时 ≤ 0.2 秒）和逆变器输出稳定。

4.2 性能测试结果

在晴天（光强 $\geq 80000lux$ ）、多云（光强不超过 $20000lux$ ）、强风（ $12m/s$ ）和低温（ $-15^\circ C$ ）三个方面进行测试。追光测试结果表明，双模追光算法使得太阳能电池板的日发电量达到 3.8 度，比传统的固定安装方式提高 32% 。

在电源稳定性试验中，系统在晴天连续工作 120 小时，蓄电池充电效率 $\geq 96\%$ ，照明负荷电压波动在 $\pm 0.3V$ 以内；雨天开启辅助充电，电池最低电量保持在 21% 左右，无断电现象；在负载切换过程中，电压脉动小于 3% ，稳定性达到 99.8% 。环境适应试验表明，该系统可在 $-15^\circ C$ 下正常启动， $60^\circ C$ 高温时容量衰减 $\leq 5\%$ ，风速 $12m/s$ 时结构不发生变形，能充分满足室外恶劣环境的使用需求。

5 系统应用推广价值

在技术层面上，将可编程控制器与太阳能供能技术进行深度融合，通过优化算法和充放电策略，提高太阳能利用效率和供电稳定性，为太阳能灯塔智能化升级提供可借鉴的技术范例。在应用层面上，考虑不同场景和区域的不同需求，实现“一个系统多场景”的适配，减少设备的重复投入。

未来应从三个方面开展研究：（1）引入物联网技术，利用 4G/5G 模块实现远程监测和参数调节，建立“云-边-端”三级管控系统，提高运维效率。（2）对储能模块进行优化，利用锂电池和超级电容的混合储能技术，进一步缩短充电时间，延长续航时间。（3）拓展负载种类，研制高电压直流输出接口，为小水泵、通讯设备等大功率负载提供电源，拓宽其应用范围。

6 结束语

综上所述，PLC 对太阳能灯塔的渗透，将原来粗放式的电能传输提升到精细的电能交流，不仅可以延长电化学循环寿命，还使光输出不再受天气影响。未来的优化，将不限于单塔的效率，而是将成千上万的灯塔，以窄带物联的方式，共享发电曲线，将多余的电量集中到虚拟电站上，缓解城市的峰谷压力，缓解偏远地区的电网压力。每一次光储合作的闪光，都是将清洁能源这一宏大的叙事投射到寻常百姓的日常生活中。

参考文献：

- [1] 庞泽宏. 工业自动化技术在太阳能路灯智能控制系统中的应用研究[J]. 光源与照明, 2025,(05):48-50.
- [2] 白玉田. 基于 PLC 技术控制的太阳能电池板智能生产线产品故障检测研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2025,(03):71-75+80.
- [3] 赵晨阳, 刘汉涛, 李世民, 丁伟. 基于 PLC 的太阳能干燥系统及其远程监控系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2025,(03):187-191.
- [4] 单超杰. 基于 PLC 技术的温室控制系统设计及试验[J]. 农机使用与维修, 2024,(11):24-28.
- [5] 孙丽萍. 基于 PLC 的太阳能光伏板清洗装置设计[J]. 电子制作, 2024,32(19):82-84+112.
- [6] 黄琰, 毛中华, 余稳, 张锦涛, 王建臣. 智能随动太阳能灯塔设计[J]. 科学技术创新, 2024,(06):225-228.