

光伏供电与建筑机电系统协同供电设计及应用

任玉泽

中芫建筑发展有限公司, 河北 保定 071000

[摘要]针对建筑机电系统能耗居高不下、光伏供电利用率低及二者协同性不足的问题, 文章对光伏组件选型、功率调节、能量存储及机电负荷匹配的关键技术进行了深入的分析, 构建基于能量管理系统(EMS)的协同控制架构, 完成系统整体设计与参数优化; 通过理论分析与仿真测试, 验证协同供电系统在能效提升、负荷匹配及运行稳定性方面的优势。研究表明, 所设计的协同供电系统可有效提升光伏自发自用率, 降低建筑机电系统对传统电网的依赖, 减少碳排放, 为建筑能源系统的低碳化、高效化转型提供技术支持。

[关键词]光伏供电; 建筑机电系统; 协同设计; 能量管理; 负荷匹配

DOI: 10.33142/ec.v9i1.18864

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Design and Application of Collaborative Power Supply between Photovoltaic Power Supply and Building Mechanical and Electrical Systems

REN Yuzhe

Zhongyuan Construction Development Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract: In response to the problems of high energy consumption, low utilization rate of photovoltaic power supply, and insufficient synergy between building electromechanical systems, this article conducts in-depth analysis of key technologies for photovoltaic module selection, power regulation, energy storage, and electromechanical load matching. A collaborative control architecture based on energy management system (EMS) is constructed to complete the overall system design and parameter optimization; Through theoretical analysis and simulation testing, verify the advantages of collaborative power supply system in energy efficiency improvement, load matching, and operational stability. Research has shown that the designed collaborative power supply system can effectively improve the photovoltaic self consumption rate, reduce the dependence of building electromechanical systems on traditional power grids, reduce carbon emissions, and provide technical support for the low-carbon and high-efficiency transformation of building energy systems.

Keywords: photovoltaic power supply; building electromechanical system; collaborative design; energy management; load matching

引言

随着全球“双碳”目标推进, 建筑领域节能减碳需求日益迫切, 建筑机电系统能源供给方式直接决定建筑的低碳水平与运行经济性。光伏发电作为清洁、可再生能源的重要形式, 将其与建筑机电系统结合实现协同供电, 可降低化石能源消耗。当前, 光伏供电与建筑机电系统缺乏有效的协同控制机制, 光伏供电的间歇性、波动性与建筑机电负荷的刚性需求不匹配, 光伏组件选型、储能配置与机电负荷特性脱节, 影响机电系统的稳定运行。因此, 本文重点围绕光伏供电与建筑机电系统协同供电的核心技术、系统架构及性能验证展开研究, 解决二者协同性不足的技术痛点, 为建筑低碳能源系统的设计与应用提供理论与技术支持。

1 光伏供电与建筑机电系统协同供电核心构成及设计原则

1.1 协同供电系统核心构成

光伏供电模块作为协同系统的能量来源, 汇流箱实现

多组光伏组件的电流汇流, 逆变器将直流电转化为交流电, 同时具备最大功率点跟踪(MPPT)功能。建筑机电负荷模块协同供电系统的能量消耗终端, 涵盖空调系统、通风系统、照明系统、给排水系统等核心子系统。能量存储模块, 储能电池用于存储光伏系统富余电能, 在光伏供电不足时释放电能, BMS负责监测储能电池的电压、电流、SOC(State of Charge)状态。协同控制与能量管理模块。光伏出力预测、机电负荷监测与预测、功率平衡调节、故障诊断与保护。

1.2 协同供电设计原则

协同供电设计需遵循以下四大核心原则: (1) 负荷适配原则: 光伏组件选型、储能配置及功率调节设备设计, 需与建筑机电系统的负荷特性精准匹配。(2) 稳定可靠原则: 协同系统需具备较强的抗干扰能力, 设置完善的故障诊断与保护机制, 保障机电系统连续稳定运行。(3) 经济合理原则: 在满足稳定运行的前提下, 优先选用性价比高的设备, 确保系统全生命周期经济性最优。

2 光伏供电与建筑机电系统协同供电核心技术

2.1 光伏组件选型与布局优化技术

光伏组件选型是协同供电系统高效运行的基础,优先选用高效单晶硅光伏组件,适合建筑屋面、墙面安装;对于建筑外立面安装场景,可选用碲化镉薄膜光伏组件。光伏组件的额定功率需根据机电系统总负荷容量及光伏自发自用率目标确定,避免电压不匹配导致的转换损耗增加。最大化利用建筑可用空间,提升太阳能采集效率。屋面布局优先采用最佳倾角安装,充分利用雨水清洁;墙面布局优先选择南向墙面,确保组件日均光照时长不低于 4h。同时,组件布局需避免串并联 mismatch 损耗,串联数需满足逆变器最大直流输入电压要求,按公式计算:

$$N_s \leq \frac{U_{inv,max}}{U_{oc,max}} \quad (1)$$

式中: N_s 为光伏组件串联数; $U_{inv,max}$ 为逆变器允许的最大直流输入电压; $U_{oc,max}$ 为单个光伏组件在最低温度下的最大开路电压。

2.2 功率调节与能量转换技术

功率调节与能量转换是实现与机电负荷协同的核心技术,光伏组件的输出功率受光照强度、环境温度影响较大,MPPT 控制技术通过实时跟踪光伏组件的最大功率点,调节组件工作电压与电流。本文采用改进型 perturb and observe (P&O) 算法,解决光照突变时跟踪滞后的问题,提高 MPPT 跟踪精度与响应时间。逆变器转换效率直接影响系统整体能效,协同系统中选用并网型三相逆变器,具备双向能量转换功能,将多余电能送入储能系统存储,或反馈至传统电网。此外,采用多回路 MPPT 设计,每路 MPPT 对应一组光伏子方阵,提升光伏系统整体发电效率。针对光伏出力波动与机电负荷突变的问题,实时监测光伏出力与机电负荷差值,当光伏出力大于机电负荷时,控制储能系统充电,确保机电系统负荷稳定供电。

2.3 储能系统优化配置技术

储能系统的配置参数影响协同系统的稳定性与光伏自发自用率,储能容量计算采用以下公式:

$$E_{bat} = \frac{(P_{pv,avg} \times T_{pv} - P_{load,avg} \times T_{load}) \times k_1 + P_{load,peak} \times T_{backup} \times k_2}{\eta_{bat,ch} \times \eta_{bat,disch}} \quad (2)$$

式中: E_{bat} 为储能系统最小容量 (kWh); $P_{pv,avg}$ 为光伏系统日均出力 (kW); T_{pv} 为光伏日均发电时长 (h); $P_{load,avg}$ 为机电系统日均负荷 (kW); T_{load} 为机电系统日均运行时长 (h); k_1 为光伏出力波动系数 (取 1.1~1.3); $P_{load,peak}$ 为机电系统峰值负荷 (kW); T_{backup} 为备用供电时长 (h); k_2 为负荷波动系数 (取 1.05~1.2); $\eta_{bat,ch}$ 为储能充电效率 (取 0.9~0.95); $\eta_{bat,disch}$ 为储能放电效率 (取 0.9~0.95)。

充电功率不超过光伏富余功率,放电功率不超过机电负荷缺口功率,同时需满足储能电池的充放电倍率限制。采用 BMS 监测每节电池的电压、温度,调节充放电电流。

优先选用磷酸铁锂电池,对于小型协同系统,可选用锂电池组,大型系统可采用储能集装箱。

2.4 机电负荷协同适配技术

将建筑机电负荷分为核心负荷与非核心负荷,核心负荷优先级最高,优先由光伏+储能系统供电;非核心负荷可根据光伏出力情况进行动态调节。针对不同类型机电负荷的特性,采用差异化的动态调节策略,采用变频控制技术,调节空调机组的压缩机转速,通过 AI 算法预测次日气温与光照强度,提前优化空调冷量储备。采用智能照明控制技术,优先利用自然光,降低照明负荷。采用基于 BP 神经网络的机电负荷预测模型,结合历史负荷数据、环境参数、使用场景等因素,预测机电系统的短期负荷 (1h 内) 与长期负荷 (1d 内),实现光伏供电与机电负荷的精准协同。

3 光伏供电与建筑机电系统协同供电系统整体设计

3.1 系统整体架构设计

构建“分布式光伏+储能调节+协同控制+机电负荷”的协同供电系统整体架构,能量采集与转换层以光伏供电模块为核心,光伏组件采集太阳能并转为直流电,汇流箱汇流多组电流后传至逆变器,逆变器将直流电转交流电,且通过 MPPT 控制实现光伏最大功率输出;其输出交流电分两路,一路供建筑机电负荷,另一路传至能量存储与分配层用于储能充电或反馈传统电网。能量存储与分配层含储能系统与功率分配装置。储能系统由磷酸铁锂电池组和 BMS 构成,依协同控制指令存/补电能;功率分配装置合理分配光伏、储能、传统电网电能,优先供机电负荷,实现三路电能无缝切换保障系统稳定运行,采用智能断路器与接触器,有过载等保护功能,适配不同电压等级负荷。协同控制与管理层核心是 EMS,联动能量采集与转换层、能量存储与分配层及机电负荷模块,实现全方位协同控制。EMS 通过数据采集模块实时采集光伏出力等数据;负荷预测模块预测机电负荷变化;协同调度模块制定光伏出力调度等策略;故障诊断模块监测设备状态并处理故障;人机交互模块实现系统状态监控与参数设置。

3.2 系统参数优化设计

明确各核心设备的参数规格,光伏系统参数优化,建筑机电日均负荷 100kW、峰值 150kW、运行 12h;光伏总装机按机电平均负荷 1.3 倍设为 130kW;选单晶硅组件,额定功率 550W、效率 22%、电压 72V,10 串/组、23 组并联共 230 块;汇流箱用 2 台 16 路型,效率 $\geq 99.5\%$;逆变器选三相并网型,额定功率 125kW、效率 $\geq 96.5\%$,具多回路 MPPT,输入 200V~800V、输出 380V,适配低压交流负荷。依公式算得储能最小容量 45kWh,实际配 50kWh,选磷酸铁锂电池组,单块 200Ah、3.2V,120 串、2 组并联;BMS 选智能型,有充放电均衡等功能,效率 $\geq 92\%$;充放电功率 25kW,倍率 0.5C,适配光伏与负荷同

率。空调用变频机组，额定 60kW、变频 10%~100%；照明用 LED 智能灯，总功率 20kW、亮度可调 0%~100%；给排水用变频水泵，总功率 20kW，动态调功率；核心负荷（应急照明等）总功率 10kW，优先光伏+储能供电，确保系统整体性能最优。各机电负荷适配参数详情如表 1 所示。

表 1 建筑机电负荷适配参数表

负荷类型	设备类型	额定功率 (kW)	适配调节方式	优先级
空调负荷	变频空调机组	60	变频调节 (10%~100%)+冷量储备优化	非核心
照明负荷	LED 智能照明	20	亮度调节 (0~100%)+自然光适配	非核心
给排水负荷	变频水泵	20	运行时段优化+功率动态调节	非核心
应急负荷	应急照明、消防水泵	10	连续供电，光伏+储能优先保障	核心

3.3 协同控制策略设计

协同控制策略确保系统在不同工况下均能高效运行。结合 MPPT 控制技术与光伏出力预测，实现光伏出力的最大化利用，根据光伏出力预测结果与机电负荷需求，调节 MPPT 跟踪参数，将光伏出力分为“负荷供给部分”与“富余部分”，负荷供给部分直接传输至机电负荷，富余部分传输至储能系统充电。当光伏出力>机电负荷，且储能 SOC<80%时，启动储能充电；当储能 SOC≥80%时，停止充电，将光伏富余电能反馈至传统电网。当光伏出力<机电负荷，且储能 SOC>20%时，启动储能放电，当储能 SOC≤20%时，停止放电，启动传统电网备用供电。优先由光伏+储能系统供电，若光伏+储能供电不足，启动传统电网供电。根据光伏出力情况动态调节，当光伏出力充足时，启动全部非核心负荷，当光伏出力不足时，先关闭部分非核心负荷，提升光伏自发自用率与系统运行效率。

4 协同供电系统性能仿真与验证

4.1 仿真模型搭建

仿真模型基于本文设计的协同供电系统架构与参数，搭建 130kW 单晶硅光伏组件模型，采用改进型 P&O 算法实现 MPPT 控制，汇流箱模型选用 16 路汇流箱，逆变器模型选用 125kW 三相并网型逆变器，转换效率≥96.5%。搭建 50kWh 磷酸铁锂电池组模型，BMS 模型具备充放电均衡与保护功能，充放电效率≥92%，充放电功率为 25kW。搭建空调、照明、给排水等负荷模型，总日均负荷 100kW，峰值负荷 150kW，核心负荷 10kW，非核心负荷 90kW。搭建 EMS 模型，实现光伏出力调度、储能充放电控制与机电负荷调节的闭环控制。

4.2 仿真测试指标与方案

测试指标：重点测试光伏自发自用率、系统运行效率、功率平衡误差、供电可靠性。分为 3 种工况开展仿真测试，

典型晴天、多云天气，光伏系统故障（停机 2h）。

4.3 仿真结果与分析

典型晴天光照强度逐时变化，6:00~18:00 有光照且强度有升有降有稳，18:00~次日 6:00 无光照。仿真显示，光伏系统日均出力中大部分被机电系统消耗，光伏自发自用率、系统运行效率高于目标值，功率平衡误差低于目标值，机电系统连续稳定供电 24h，供电可靠性达目标值。分析表明，此工况下协同供电系统可高效利用光伏电能，运行高效稳定。多云天气光照强度波动大且频率高，模拟光照突变场景。仿真显示，光伏系统日均出力部分被机电系统消耗，各项指标均达目标值。分析表明，改进型 MPPT 算法、储能系统实时充放电调节及机电负荷动态调节，使系统功率平衡与抗干扰能力强，可保障机电系统稳定运行。设置光伏系统在特定时段停机 2h，测试系统备用供电能力。仿真显示，储能系统先放电，SOC 降至一定程度后传统电网备用供电，机电系统连续稳定供电 24h，故障恢复后系统快速切换且运行平稳。分析表明，储能系统与电网可无缝切换，系统备用供电能力强，供电可靠性满足要求。三种工况仿真测试结果汇总，所有测试指标均达设计目标，表明本文设计的协同供电方案具备高光伏自发自用率、运行效率、功率平衡能力与供电可靠性，能有效解决光伏出力波动与机电负荷刚性需求矛盾，实现高效协同。

5 结论

本文构建了光伏供电与建筑机电系统协同供电系统的核心构成的框架，储能系统优化配置技术、光伏组件选型与布局优化技术等，为协同供电系统的设计提供了指导，提升了系统的高效性与稳定性，减少碳排放。未来可拓展协同供电系统的应用场景、引入人工智能算法，以及新型储能技术与协同供电系统的结合，提升光伏出力与机电负荷的预测精度与系统运行效率。

[参考文献]

- [1]张磊,李娟,王浩.光伏与建筑机电系统协同控制技术研究[J].建筑节能,2023,51(7):123-128.
- [2]刘敏,陈峰,赵阳.基于 MPPT 优化的光伏-建筑机电协同供电系统设计[J].电力自动化设备,2022,42(11):156-162.
- [3]王健,李丽,张宇.储能系统在光伏-建筑机电协同供电中的优化配置[J].储能科学与技术,2023,12(3):987-994.
- [4]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50797-2012 光伏发电站设计标准[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [5]陈勇,刘芳,张庆.建筑光伏组件布局优化设计研究[J].太阳能学报,2023,44(5):2134-2140.

作者简介：任玉泽（1993.8—），毕业院校：河北建筑工程学院，所学专业：建筑电气与智能化，当前工作单位：中苑建筑发展有限公司。