

本文引用格式: 张渊晟,林海,冯杰钊.城市办公楼光储系统控制策略分析及应用[J].自动化与信息工程,2023,44(6):52-59.

ZHANG Yuansheng, LIN Hai, FENG Jiezhao. Analysis and application of control strategies for photovoltaic-storage system in urban office buildings[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(6):52-59.

城市办公楼光储系统控制策略分析及应用*

张渊晟¹ 林海² 冯杰钊²

(1.广州汇锦能效科技有限公司, 广东 广州 510660

2.华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 在“双碳”目标提出后,“光储直柔”技术逐渐成为建筑领域节能减碳、灵活用电的研究热点。为深入探讨城市办公楼能源利用的控制策略,提升可再生能源的利用率,该文以深圳市某办公楼的光储系统为研究对象,首先,对其微电网的运行工况进行建模;然后,构建光储系统的3种运行模式:简单模式、经济模式和节能模式,及与这3种运行模式对应的控制策略;最后,进行具体案例的分析对比。对比分析结果表明,提高光伏自用率有利于降低用电成本,提升光储系统的可调节性,对同类建筑的光储系统应用优化具有一定的参考价值。

关键词: “光储直柔”技术;光储系统;运行模式;控制策略

中图分类号: TU18

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2023)06-0009-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2023.06.009

Analysis and Application of Control Strategies for Photovoltaic-storage System in Urban Office Buildings

ZHANG Yuansheng¹ LIN Hai² FENG Jiezhao²

(1.Guangzhou HuiJin Energy Efficiency Technology Co., Ltd., Guangzhou 510660, China

2.School of Electric Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: After the proposal of the "dual carbon" goal, "photovoltaic-storage-DC-flexible" technology has gradually become a research hotspot in the field of energy conservation, carbon reduction, and flexible electricity use in the construction industry. To deeply explore the control strategies for energy utilization in urban office buildings and improve the utilization rate of renewable energy, this paper takes the photovoltaic-storage system of an office building in Shenzhen as the research object. Firstly, the operating conditions of its microgrid are modeled; Then, construct three operating modes of the photovoltaic-storage system: simple mode, economic mode, and energy-saving mode, and corresponding control strategies for these three operating modes; Finally, analyze and compare specific cases. The comparative analysis results show that improving the self use rate of photovoltaics is beneficial for reducing electricity costs, improving the adjustability of photovoltaic-storage systems, and has certain reference value for optimizing the application of photovoltaic-storage systems in similar buildings.

Keywords: photovoltaic-storage-DC-flexible technology; photovoltaic-storage system; operating mode; control strategies

0 引言

“碳达峰”“碳中和”理念的提出,使我国太阳能光伏产业的发展模式发生了转变,光伏发电技术也在不断被突破^[1]。据统计,目前我国建筑全过程碳排放量占全国碳排放量的比例超过50%,建筑行业是我国低碳发展的重要领域^[2-3],将“光储直柔”技术与建

筑用电结合是研究热点。“光储直柔”技术即光伏发电、分布式储能、直流配电、柔性控制技术,可实现光伏消纳、储能与市电用电之间的负荷动态匹配^[4]。将光伏与建筑一体化,并配置储能设备和直流供电配电系统,通过构建建筑光储系统进行负荷柔性调节和智慧能源管控,对不同应用场景制定不同的光储系统

52 * 基金项目: 广州市番禺区一般医疗卫生项目: 绿色医院能碳智慧管理系统研究与应用(2023-Z04-069)

控制策略, 可实现建筑的绿色经济用电^[5-6]。

江亿等^[7]提出“光储直柔”新型配电系统的蓄能能力和负荷侧功率可调节能力, 将在未来建筑零碳电力中发挥重要的作用。荣秀婷等^[8]提出调控电动汽车充放电行为是调节商务楼宇负荷曲线的重要方法。目前, 城市办公楼光储系统铺设的光伏面积有限, 且太阳能波动性较大, 需要综合的能源管理和光储系统控制策略来提高系统的经济性, 降低系统能耗。

本文分别从经济和节能的角度, 对深圳市某办公楼的光储系统运行模式进行优化, 提出 3 种运行模式和控制策略, 可有效降低传统商业用电能耗, 促进建筑灵活用电和节能减碳。

1 模型构建

1.1 办公楼光储系统

本文以深圳市某办公楼的光储系统为研究对象, 其系统架构如图 1 所示。

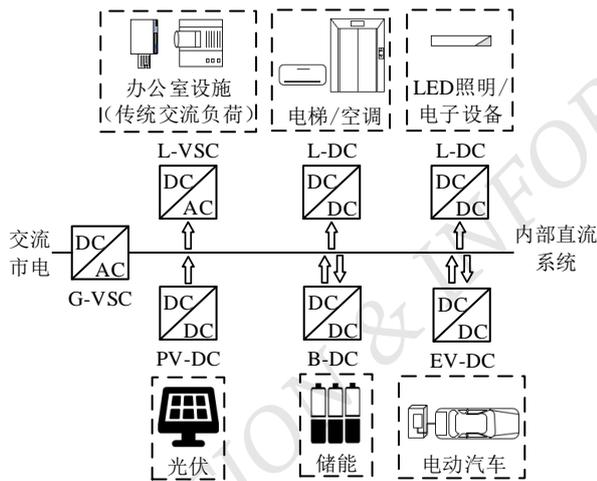


图 1 某办公楼光储系统架构

该办公楼光储系统的特点如下:

1) 办公楼总建筑面积为 2 500 m², 在楼顶和停车场共铺设面积约 500 m² 的太阳能光伏阵列, 装机容量为 150 kWp, 楼宇总负荷容量为 225 kW;

2) 办公楼采用中小规模的电池储能系统来平抑光伏的不稳定^[9]; 该办公楼配置 150 kWh 的电池储能系统, 放电深度设置为 95%, 最低荷电状态 (state of charge, SOC) 设为 5%;

3) 办公楼的用电负荷分为不可控和可控用电负荷, 其中照明、办公室设施、电子设备、电梯和安防系统等属于不可控用电负荷; 空调、电动汽车等属于可控用电负荷^[10-11]。根据《民用建筑电气设计标准 GB 51348—2019》对办公建筑内不同等级负荷的划分标准, 办公室设施、楼宇主要通道的照明、电梯和安防系统等一级负荷采用市电供电; 楼宇外部等场所的照明、部分可适时中断的电子设备等二级负荷采用光伏供电; 可控用电负荷结合实时光伏出力可采取不同的配电供电策略;

4) 停车场配置了 25 个快充直流充电桩, 充电功率依据当天的供电情况设置为 30~60 kW, 设定每天充电桩的使用率为 80%, 平均每个充电桩输出电能为 40 kWh, 电动汽车平均每日总能耗为 800 kWh。

1.2 数学模型构建

1.2.1 光伏模型

光伏发电的输出功率受环境温度、太阳光辐射强度和配置额定功率的影响, 计算模型为

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_c}{G_{STC}} (1 + \kappa(T_c - T_{STC})) \quad (1)$$

式中: P_{PV} 为实际光伏输出功率; P_{STC} 为标准条件下光伏发电额定输出功率; G_c 为光伏发电实际接收的光照强度; G_{STC} 为在标准条件下光伏发电所需的光照强度, 取 $G_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$; κ 为光伏发电功率输出时的温度系数, 取 $\kappa = 0.0047 \text{ } ^\circ\text{C}$; T_{STC} 为标准条件下光伏面板表面温度, 取 $T_{STC} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$; T_c 为实际光伏面板的表面温度, 由于其在实际中不易测量, 一般根据经验公式估算:

$$T_c = T_{STC} + 30 \times \frac{G_c}{1000} \quad (2)$$

1.2.2 储能模型

储能设备有充能、放能和静置 3 种工作状态。本文采用的储能材料为锂电池, 主要考虑其充放电功率和当前电量。电池实际的 SOC 由起始 SOC、充放电时间和电流大小决定, $t-1$ 时刻到 t 时刻的电池 SOC 为

$$SOC_t = SOC_{t-1} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_1 \cdot \Delta t}{24}\right) + \frac{I_{bat}(t) \cdot \Delta t \cdot \beta_{bat}}{C_{bat}} \quad (3)$$

式中： α_1 为电池的自放电率，由电池的累计电量及健康状态（state of health, SOH）决定； β_{bat} 为电池充放电效率； C_{bat} 为电池额定容量； I_{bat} 为电池充放电的电流。SOH 代表电池当前的容量状态，在计算中忽略电池的容量衰减。

1.2.3 技术性经济性评价模型

本文以光伏自用率作为光伏发电的主要技术性评价指标。光伏自用率（ U_p , %）表示光伏电能发自自用所占的比例，计算公式为

$$U_p = \frac{W_p - W_e}{W_p} \times 100\% \quad (4)$$

式中： W_p 和 W_e 分别为光伏总输出电能及光伏总并网电能。

单日内办公楼光储系统总用电成本（ C_0 , 元）为

$$C_0 = \sum_{n=1}^{24} (c_i \cdot p_i - c_e \cdot p_e) \quad (5)$$

式中： c_i 和 c_e 分别为电网输入系统电能及光伏并网电能， p_i 和 p_e 分别为实时市电电价及光伏并网电价。

1.3 运行模式及控制策略

根据该办公楼的日照条件、光伏铺设情况、用能特点等数据，通过 Homerpro 和 MATLAB 软件进行模型计算。根据办公楼用电的个性化需求，设计经济模式和节能模式 2 种光储系统运行模式。为了与经济模式、节能模式进行对照，本文还讨论了只有光伏发电和市电供电的简单模式。

1.3.1 简单模式及控制策略

简单模式无储能设备的参与，不考虑光伏上网、峰谷电价和节能管理策略，其控制流程如图 2 所示。

不可控用电负荷中的一级负荷由市电供电，其余用电负荷优先考虑光伏供电，当光伏供电不足时，用市电作为补充，简单模式控制策略如表 1 所示。

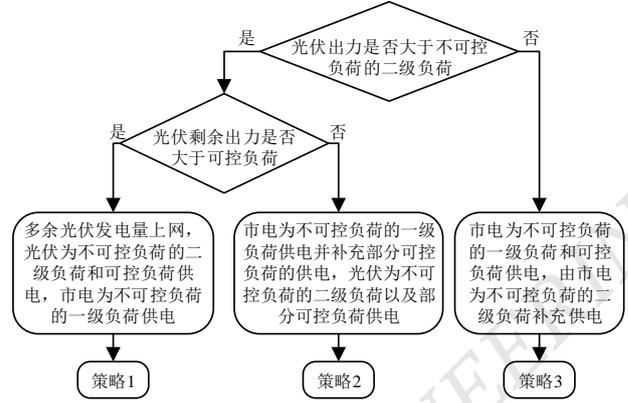


图 2 简单模式控制流程

表 1 简单模式控制策略

控制策略	不可控负荷（包括一级和二级负荷）供电	可控负荷供电	储能状态
策略 1	光伏/市电	光伏	无
策略 2	光伏/市电	光伏/市电	无
策略 3	光伏/市电	市电	无

1.3.2 经济模式及控制策略

经济模式的控制策略是优先考虑用电成本，在尽可能低的成本下保证用电负荷的稳定供电。储能设备结合峰谷电价进行移峰填谷，即在谷价段购入市电进行储存，在峰价段由储能设备放电。目前广东省光伏上网电价为 0.453 元/kWh，某些时段市电电价比光伏电价低，此时优先使用市电，光伏发电量上网，可节省用电成本。针对电动汽车的充电需求，根据分时电价制定价格优惠政策，引导车主在市电电价较低时段或办公楼用电低谷时段为电动汽车充电。经济模式控制流程如图 3 所示，控制策略如表 2 所示。

根据市电电价与光伏上网电价的关系，经济模式分为以下应用场景：

- 1) 当市电电价低于光伏上网电价时，尽量让光伏上网，不可控用电负荷由光伏供电改为市电供电；可控用电负荷供电根据储能设备的状态调整，若储能设备的 SOC 未达到 80%，则在市电电价较低的时段用市电为储能设备充电，市电为可控用电负荷供电；若储能设备电量充足即 SOC 达到 80% 以上，由储能设备为可控用电负荷供电；

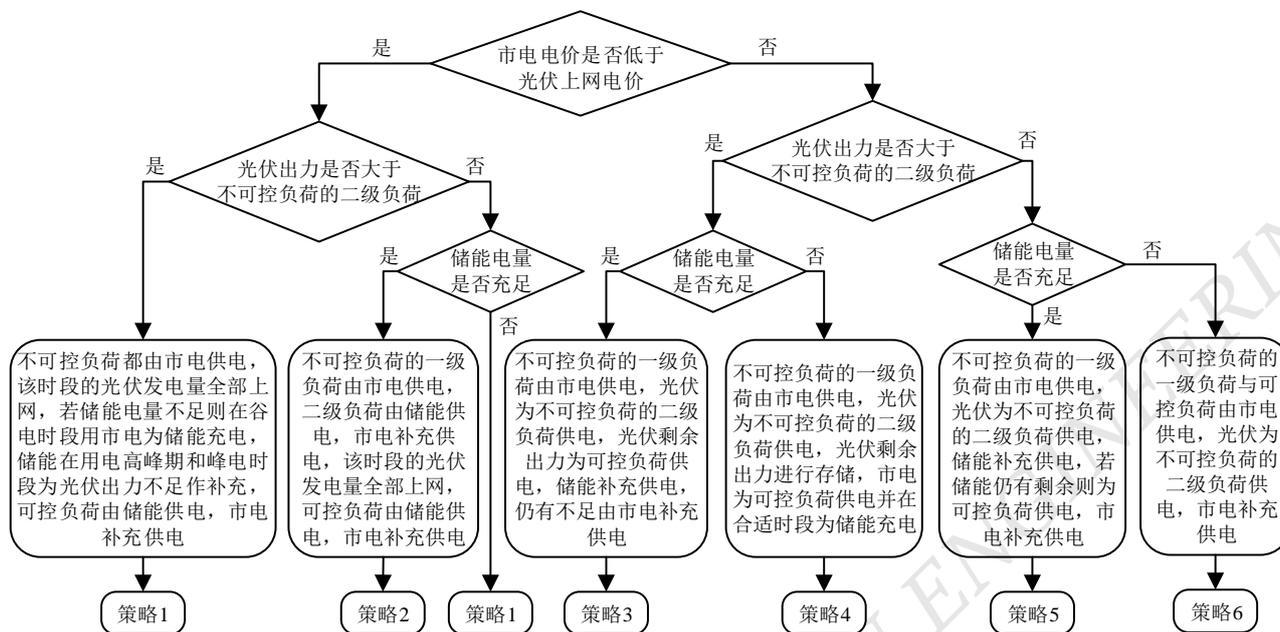


图3 经济模式控制流程

表2 经济模式控制策略

控制策略	不可控负荷（包括一级和二级负荷）供电	可控负荷供电	储能状态
策略1	市电（光伏全部上网）	储能/市电	合适时段接受市电，并为可控负荷供电
策略2	市电/储能（光伏全部上网）	储能/市电	为可控负荷和部分不可控负荷供电
策略3	市电/光伏	光伏/储能/市电	补充向可控负荷供电
策略4	市电/光伏	市电/储能	接受光伏余电
策略5	市电/光伏/储能	储能/市电	向可控负荷和部分不可控负荷补充供电
策略6	市电/光伏	市电	低电量

2) 当市电电价高于光伏上网电价时，光伏出力优先满足不可控用电负荷的二级负荷，若还有余力再

为可控用电负荷供电；若光伏出力不足，由储能设备或市电补充供电；储能设备主要接受光伏的余电，光伏出力不足时，在低电价时段接受市电。

1.3.3 节能模式及控制策略

节能模式的控制策略是优先考虑光伏发电，提高光伏自用率，并考虑节能管理策略控制设备开关和调节设备的运行状态，使该模式下的能耗最小；储能设备只存储光伏剩余出力。节能模式控制流程如图4所示，控制策略如表3所示。

当市电电价低于光伏上网电价时，优先考虑光伏供电，由储能设备或市电补充供电。节能模式在光伏出力不足时，对可控用电负荷以最低需求供电：优先降低充电桩的服务需求，适当下调充电桩的使用率和充电功率，另外由于电动汽车电池的SOC有一定范围，考虑到电池性能和能源调度的最优方案，优先对SOC最小的电动汽车进行充电^[12-13]；降低空调能耗，如人为调节空调温度以降低空调功率或合理停用某些不影响正常工作区域的空调。

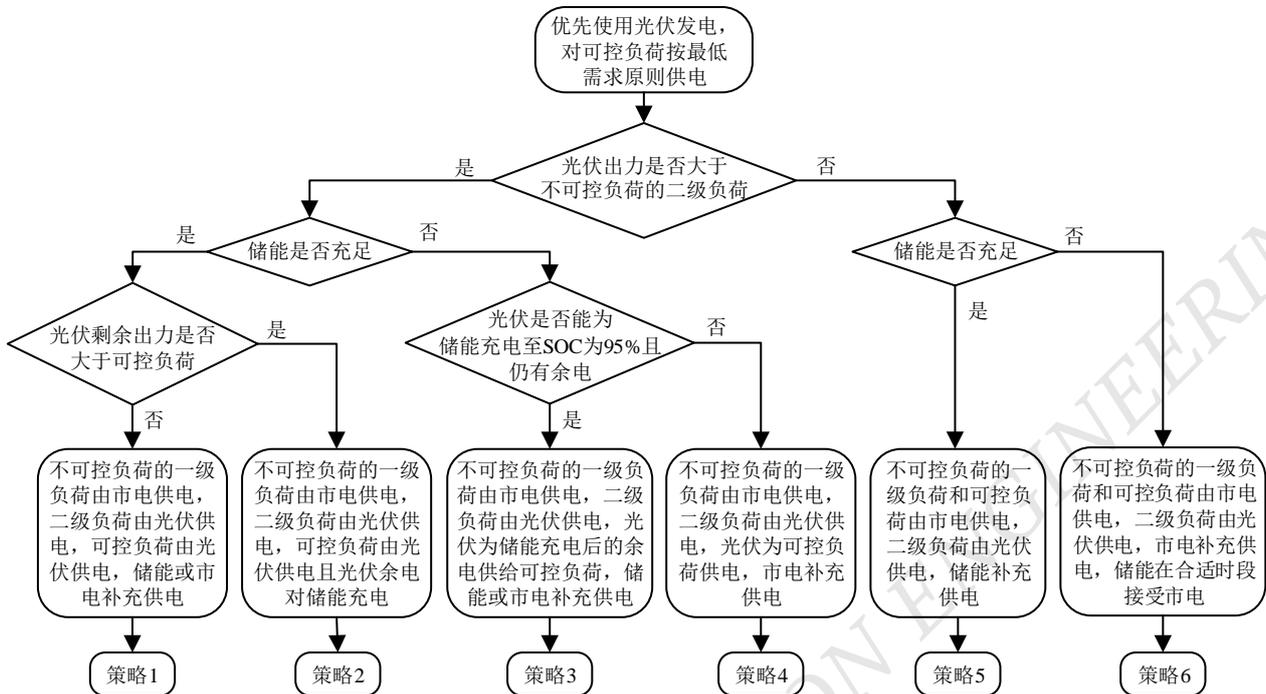


图 4 节能模式控制流程

表 3 节能模式控制策略

控制策略	不可控负荷（包括一级和二级负荷）供电	可控负荷供电	储能状态
策略 1	市电/光伏	光伏/储能/市电	补充向可控负荷供电
策略 2	市电/光伏	光伏	接受光伏余电
策略 3	市电/光伏	光伏/储能/市电	接受光伏发电/补充向可控负荷供电
策略 4	市电/光伏	光伏/市电	低电量
策略 5	市电/光伏/储能	市电	补充向不可控负荷的二级负荷供电
策略 6	市电/光伏	市电	合适时段接受市电

根据光伏出力大小和储能状态，节能模式分为以下应用场景：

1) 光伏出力大于不可控用电负荷的二级负荷需

求：若储能电量充足，光伏为不可控用电负荷的二级负荷、可控用电负荷供电的优先顺序为光伏>储能>市电，若光伏仍有余电则为储能充电；若储能电量不足，光伏为不可控用电负荷的二级负荷供电后优先为储能充电，可控用电负荷供电的优先顺序与上述一致，当光伏出力不足，储能设备处于低电量，可控用电负荷的需求应根据节能管理策略适当调整，并购入市电为其供电；

2) 光伏出力小于不可控用电负荷的二级负荷需求：若储能电量充足，不可控用电负荷的二级负荷供电的优先顺序为光伏>储能，同时购入市电对可控用电负荷以最低需求供电；若储能电量不足，可控用电负荷供电的优先顺序与上述一致，而不可控用电负荷的二级负荷供电的优先顺序为光伏>市电。储能设备应结合峰谷电价在用电低谷期充入市电。

2 案例分析

本文选取深圳市 2023 年 7 月的气象数据进行分析，平均日照时长约为 7.5 h，相关气象数据如图 5 所示。

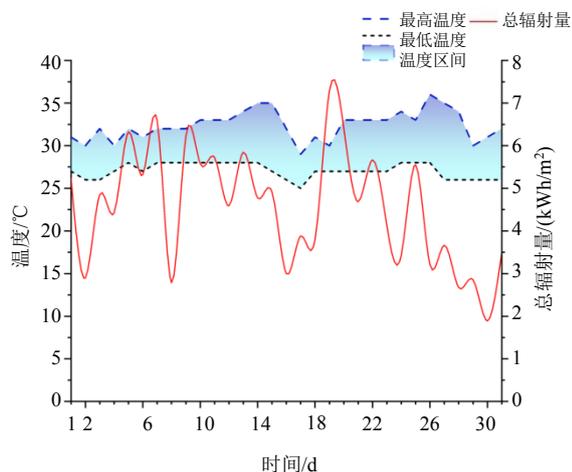


图5 夏季7月气象数据

从图5中选取某一典型日24h的数据计算当日光伏每小时的输出功率，结果如图6所示。

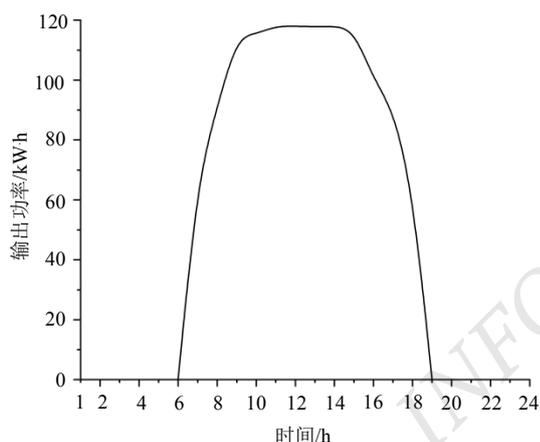


图6 典型日光伏每小时的输出功率

由图6可以看出，光伏出力时间为6~19时，在中午12时达到最大出力，1h内最大出力约为118 kW，当日光伏发电量为1 230 kWh。

由于该办公楼的光伏铺设面积有限，一天的光伏发电量仅能满足约2/3的办公楼总用电负荷。典型日24h各类用电负荷逐时能耗如图7所示。

由图7可以看出，光伏出力和总能耗的峰谷时间点基本一致。电动汽车、空调、办公室设施及电子设备是主要用电负荷，三者总耗电量分别约占总能耗的40.5%、36.9%和12.4%，其余用电负荷的耗电量大小顺序为电梯>照明>安防系统。空调的用电高峰在11~14时；电动汽车充电密集时段在8~16时；办公

室设施及电子设备的用电高峰在8~18时，18时后办公室内仍有加班负荷以及少数网络设备和待机设备负荷用电。

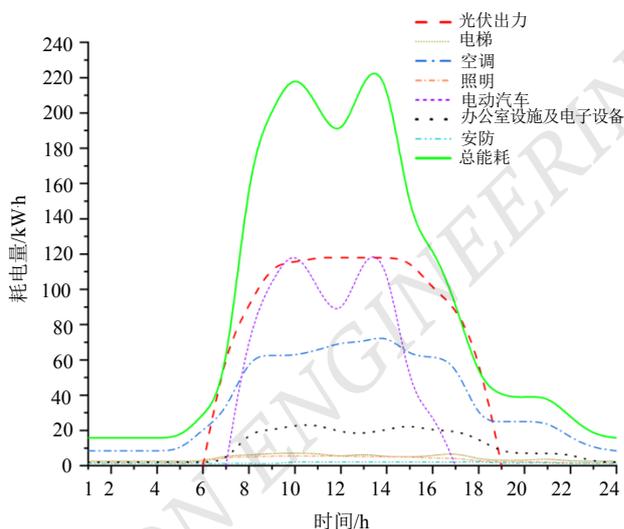


图7 各类用电负荷逐时能耗

深圳市工商业市电电价区间段如图8所示。

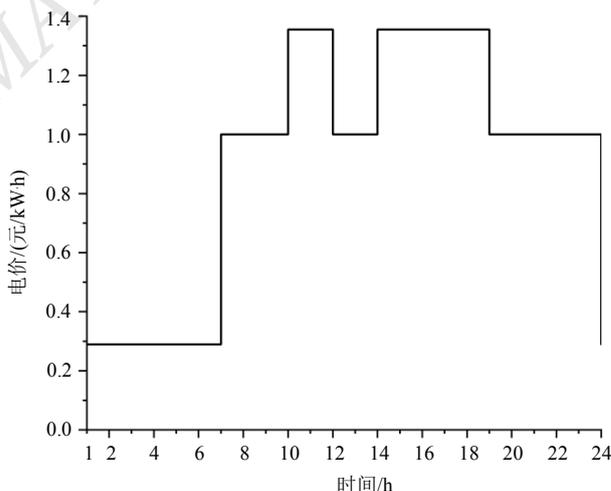


图8 深圳市工商业市电电价区间段

由图8可知，在10~12时、14~19时为峰价段，电价为1.355元/kWh；在7~10时、12~14时、19~24时为平价段，电价为1.0元/kWh；在24~次日7时为谷价期，电价为0.289元/kWh。

根据深圳市峰谷电价政策，在光伏出力相同的情况下，分别分析简单模式、经济模式、节能模式下光伏、储能供电及市电购入的情况。由于办公楼的光伏装置不变，故分析时忽略光伏发电及光伏设备维护的

成本。

2.1 简单模式

简单模式下各供电电源逐时供电的情况如图9所示。

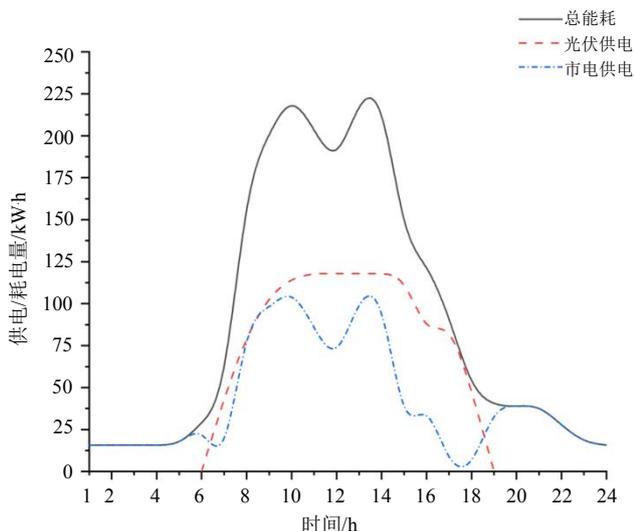


图9 简单模式下各供电电源逐时供电的情况

由图9可知, 19~次日6时的所有用电负荷都由市电供电, 14~17时市电供电有明显下降趋势。24 h的总能耗为1966 kWh, 其中光伏供电量约占60.7%, 市电供电量约占39.3%, 光伏的弃电量约为87.5 kWh, 光伏发电的自用率为92.66%, 市电购入的成本约为1011.35元。

2.2 经济模式

经济模式下各供电电源逐时供电的情况如图10所示。为了更好地区分光伏总出力与光伏为办公楼负荷的总供电量, 图10中光伏供电不包括光伏为储能设备充电的部分, 而市电供电包括了市电为储能设备充电部分的所有购入电量。

由图10可知, 6~7时为市电谷价阶段, 此时光伏发电量全部上网, 由市电对可控用电负荷和不可控用电负荷补充供电, 这相较于此1 h内的光伏发电全部自发自用节省了16.9元; 光伏发电从7时开始为办公楼负荷供电, 剩余出力存储在储能设备, 无弃电情况。由储能电量曲线可知, 储能设备经过了4次充电, 在7~8时由光伏余电和平价段市电充电; 13~14时由平价段市电充电; 15~18时由光伏余电充电; 24~次日1时由谷价段市电充电。24 h的总能耗为1966 kWh,

其中光伏供电量约占55.4%, 储能供电量约占20%, 市电供电量约占24.6%。光伏与市电为储能设备的总充电量分别占39%和61%, 光伏发电的自用率为95.88%, 较简单模式略有提高。计入上述节省的费用, 市电购入成本为642.96元, 加上储能设备的平均维护成本, 该24 h的用电成本为891.54元, 较简单模式节省了约120元。

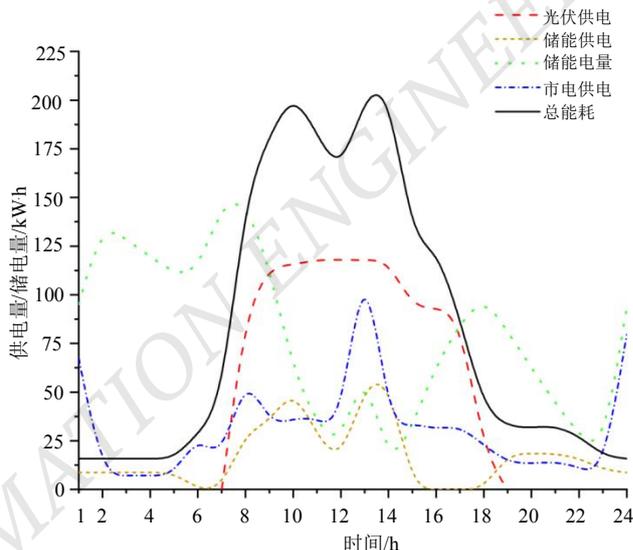


图10 经济模式下各供电电源逐时供电的情况

2.3 节能模式

节能模式下各供电电源逐时供电的情况如图11所示。图11中光伏供电与市电供电的曲线与经济模式中所述内容一致。

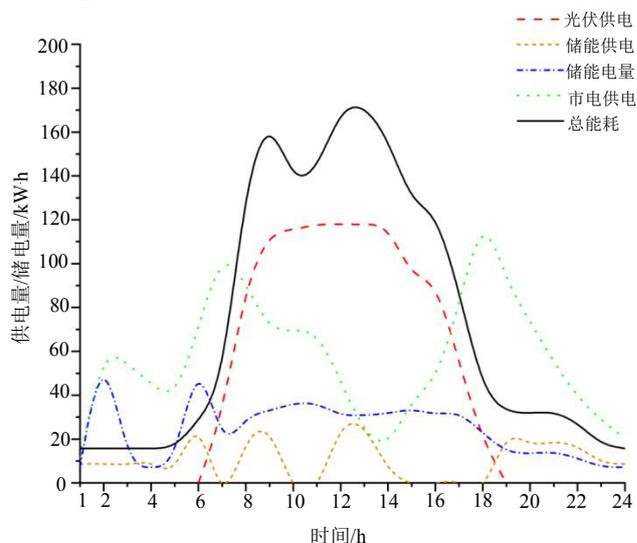


图11 节能模式下各供电电源逐时供电的情况

由图 11 可看出, 储能设备经过了 3 次充放电过程, 在 8~9 时、12~14 时, 当光伏出力不足时由储能设备补充供电, 同时合理调低可控用电负荷的用电需求, 减少了市电的使用量。

在节能模式下, 24 h 的总能耗为 1 804 kWh, 较之前有所下降, 其中光伏供电量约占 60.1%, 储能供电量约占 13.6%, 市电供电量约占 26.3%, 由于光伏的其余出力都通过储能进行供电, 故光伏发电的自用率达到 100%。市电购入总电量约为 588.9 kWh, 相较于简单模式和经济模式分别减少了约 183.7 kWh 和 134.6 kWh。随着市电购入量的减少, 购电成本也相应降低至 551.2 元, 加上储能设备的平均维护成本 (不考虑光伏成本的情况下), 该 24 h 的用电成本投入为 703.75 元, 较简单模式和经济模式分别节省了 307.6 元和 187.8 元。

3 结论

本文根据“光储直柔”技术在城市办公楼光储系统的应用情况, 构建了简单模式、经济模式、节能模式 3 种运行模式, 并制定了对应的控制策略, 结合具体案例进行对比分析, 结果如下:

1) 相比于简单模式, 经济模式加入了储能设备进行移峰填谷, 并考虑了光伏上网策略, 使光伏发电自用率从 92.66% 提高至 95.88%, 且 24 h 的用电成本减少了约 11.87%;

2) 节能模式在经济模式的基础上加入了节能管理策略, 在不影响办公楼正常运营的情况下, 灵活调节可控用电负荷的用电需求, 光伏发电自用率可达 100%, 且市电购入量减少, 24 h 的用电成本较经济模式和简单模式分别减少了 187.8 元和 307.6 元;

3) 光伏发电自用率越高, 市电的使用越少, 则

用电成本越少, 办公楼的光储系统可调节性越高。推进光伏建筑一体化, 在办公楼进行光伏立面铺设可有效扩大光伏利用面积和提高每日光伏发电量, 更有利于办公楼的绿色经济用电。

参考文献

- [1] 王捷, 林余杰, 吴成坚, 等. 碳中和背景下太阳能光伏产业现状及发展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 731-732.
- [2] 佚名. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022 年)[J]. 建筑, 2023(2): 57-69.
- [3] 曹磊, 袁天驰. “双碳”目标下光伏建筑一体化发展现状及前景分析[J]. 智能建筑电气技术, 2022, 16(4): 42-45; 54.
- [4] 胡春雨. “光储直柔”技术在“零碳”建筑中的设计与应用[J]. 安装, 2023(5): 80-82.
- [5] 周微, 王越. “光储直柔”技术——基于“碳达峰、碳中和”目标的民用建筑电气系统探索[J]. 建筑与预算, 2023(5): 53-55.
- [6] 况东. 绿色低碳建筑电气设计的几大环节及“光储直柔”系统的应用研究[J]. 电气应用, 2023, 42(1): 54-59.
- [7] 江亿, 胡珊. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. 暖通空调, 2021, 51(5): 1-13.
- [8] 荣秀婷, 张辉, 朱刘柱, 等. “双碳”目标下商务楼宇“光储直柔”恒功率运行研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 223-227.
- [9] 孙伟卿, 裴亮, 向威, 等. 电力系统中储能的系统价值评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 47-55.
- [10] 夏震, 程若发. 考虑用电特征的楼宇负荷分类优化调度仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 98-102.
- [11] 杨俊, 曾乐, 何志勇. 大型起竖装备液压系统设计与压力切换控制[J]. 机床与液压, 2019, 47(4): 137-140.
- [12] 周晓. 需求响应在大型智能商业楼宇能量管理中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [13] 李俊, 汤宝平, 舒云龙, 等. 自供电无线振动传感器网络的双模组振动能量收集与管理方法[J]. 中国测试, 2019, 45(9): 76-83.

作者简介:

张渊晟, 男, 1984 年生, 本科, 工程师, 主要研究方向: 能源管理和控制、低碳发展。E-mail: 17755580@qq.com

林海, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 节能低碳、新能源及多能互补。E-mail: 346099979@qq.com

冯杰钊, 男, 1998 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 垃圾焚烧发电、数值模拟、风光火储。Email: fengjiezhao98@163.com