

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.09.007

基于相变储能的建筑光伏系统储能优化配置研究

Optimized configuration of energy storage devices of building photovoltaic system with phase-change energy storage

王秋惠¹, 孙立国², 李佳雯^{3*}
WANG Qiuhui¹, SUN Liguang², LI Jiawen^{3*}

(1.上海和运工程咨询有限公司, 上海 200131; 2.华能九台电厂, 长春 130022; 3.东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

(1.Shanghai Heyun Engineering Consulting Company Limited, Shanghai 200131, China; 2.Huaneng Jiutai Power Plant, Changchun 130022, China; 3.College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

摘 要:随着城市的扩张和建设,建筑能耗日益增长,由此引发的能源危机和环境污染问题迫在眉睫,而合理构建建筑微网,消纳可再生能源,可有效缓解电网压力,实现清洁、低碳发展。针对建筑光伏系统光伏消纳率低,负荷峰谷差大等问题,构建了考虑相变储能的建筑光伏系统,同时引入需求响应。由相变储能联合空调共同满足建筑内温控负荷需求,并给出系统调度策略,建立储能优化模型,以实现系统运行成本最小化为目标,采用粒子群算法对模型进行求解,实现了对系统储能容量进行优化配置,对系统进行经济技术分析。通过算例分析对 5 种配置方案进行对比,结果表明该优化系统不仅能有效降低成本,还能提高光伏消纳率并降低负荷峰谷差。

关键词:相变储能;建筑光伏系统;需求响应;光伏消纳率;峰谷差;建筑微网;碳中和

中图分类号:TM 73;TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)09-0054-08

Abstract: With the expansion of cities, energy consumption of buildings is increasingly growing. The energy crisis and environmental pollution resulting from it are imminent. Therefore, constructing a micro-grid for buildings properly and consuming renewable energy thoroughly can effectively relieve the pressure of the power grid and realize its clean and low-carbon development. Aiming at the problems of low PV power consumption rate and large peak-valley load difference in building photovoltaic systems, a photovoltaic system with phase-change energy storage and its demand response mechanism are introduced. Under the premise of considering demand responses, a phase-change energy storage system is designed integrated with air conditioners, to jointly meet the temperature-controlled load of a building. The scheduling strategy is given, and an energy storage optimization model for the system is established. To minimize the system operation cost, taking particle swarm algorithm to solve the model, the optimized configuration of the energy storage system capacity can be obtained. Then, an economic and technical analysis is carried out on the system. Finally, five configuration schemes are compared based on case studies. The results show that the scheme proposed not only effectively reduces the cost, but also effectively improves the PV power consumption rate and reduces the peak-valley load difference.

Keywords: phase-change energy storage; building photovoltaic system; demand response; PV power consumption rate; peak-valley load difference; microgrid for buildings; carbon neutrality

0 引言

随着建筑能耗日益增长,为应对能源危机和环境污染问题,建筑光伏系统应运而生。然而,光伏出力往往与负荷需求不匹配,出现大量弃光现象。

同时,微网内大量安装蓄电池,存在寿命短、成本高等问题。因此,合理构建建筑微网结构具有重要的经济和技术意义。

为提高光伏消纳率,优化负荷曲线,已有不少学者对此进行探究,并取得了有效的研究成果。文献[1]以光伏利用率最大和年净利润最大为目标,构建了基于电量电价弹性矩阵的用户多时段电价

响应模型。文献[2]构建了含有分布式光伏、储能系统以及需求响应的光伏微网系统。文献[3]基于电压灵敏度的随机场景模拟法对配电网光伏消纳能力进行评估,为减小光伏系统并网功率的间歇性和波动性,对系统的储能容量进行优化配置。储能装置在综合能源系统中充分利用可再生能源,平抑负荷和能源的间歇性、波动性^[4]。文献[5]提出一种新的热储和电储系统最优容量配置方法。

上述研究在储能系统中都单纯地考虑了储电方式,并没有考虑储热带来的效益。据统计,我国电力峰值负荷中,夏季空调供冷负荷和冬季供热负荷占据很大比例。相比于储电,储热、储冷具有更大的储能容量,投资建设成本、运行维护成本也相对较低。因此,将储电技术转向储热、储冷技术,充分利用富余的光伏发电量并在用电低谷时段进行储热,在用电高峰时段释放热量替代空调参与调节建筑室内温度,是降低用电高峰时段电负荷需求,降低负荷峰谷差并提高系统光伏消纳率的有效手段,同时符合碳中和目标下构建新能源为主体电力系统的的需求。

储热、储冷的关键在于储能材料的选择。相变储能(PCM)作为一种新型储能技术,近年来在储能和建筑领域得到了广泛关注。不同种相变材料以不同比例混合可得到人体舒适的相变温度,同时相变材料价格低廉、寿命长、运行维护成本低、易于大规模制备的特点,吸引了很多学者的注意力。文献[6]提出一种新型的微网综合能源消纳系统,用PCM在功能上取代空调的同时,实现微网富余能源消纳与削峰填谷的功能。文献[7]提出了一种考虑风-光-热波动的建筑PCM电热联合调度方法,并采用分段线性化法进行求解,证明了所提调度模型的有效性和实用性。

到目前为止,并未有学者将PCM和需求响应同时引入建筑微网中进行分析研究。基于此,本文构建了考虑PCM的建筑光伏系统,建立需求响应模型,以系统日成本最小化为目标,提出了一种储能容量优化方法。算例分析结果验证了本文建筑微网能源及调度策略的有效性和经济性。

1 基于PCM的建筑光伏系统模型

本文以建筑用电系统为中心,建立一个光伏微网。与传统光伏微网不同的是,本系统的储能系统不仅含有蓄电池,还采用了PCM技术,系统结构如图1所示。光伏系统为建筑照明、电器等提供电能,PCM系统可提供建筑内生活用水、采暖等所需热能。

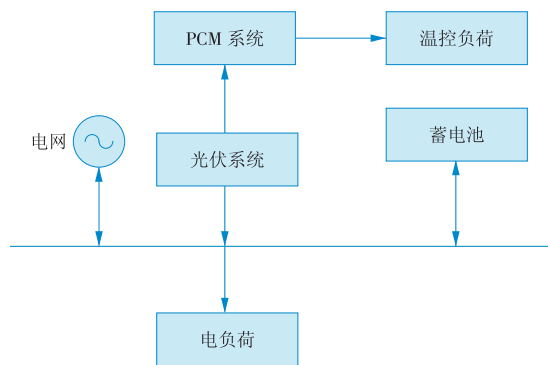


图1 系统结构

Fig. 1 System structure

1.1 分布式光伏模型

分布式光伏建筑一体化发电微网系统主要含有光伏电池板、蓄电池、逆变器、配电器和相关测控装置等器件,具有十分灵活的工作方式,既能实现建筑孤岛运行,又能发电上网,可自我管理和控制^[8-9]。在本研究中,光伏系统发电优先满足建筑内负荷需求,富余电量先后对蓄电池和PCM系统充电,若仍有富余,发电上网,给用户带来售电收益,在发电不足时,从电网购电,实现建筑全时段用电需求。

1.1.1 光伏系统出力特性

光伏出力受天气、地理位置等因素影响,具有波动性和不确定性。光伏系统的发电量可由监测系统实时监测得到,由此可得到光伏系统日出力曲线如图2所示。光伏系统出力曲线呈抛物线形波动,是其本身固有的波动特性,受云层遮挡等因素影响。

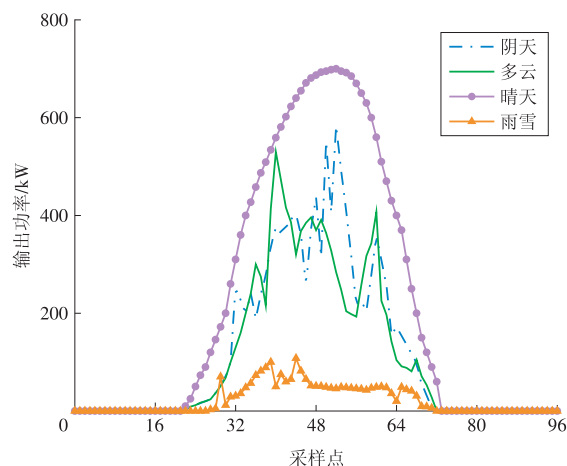


图2 光伏系统日出力曲线

Fig. 2 Daily output of the PV system

图2为不同天气情况下典型的光伏系统日出力曲线,每隔15 min采样1次,06:00光伏系统开始出力,并随着光照强度的增加,光伏系统出力逐步上升,在12:00左右达到最大值,随后进入下降阶段,

直到 18:00 左右下降为零,夜间由于没用光照,光伏系统出力为零。

光伏出力与负荷曲线不匹配时,会出现大量弃光现象,大大降低了光伏发电的利用率,可用光伏消纳率来表征光伏系统的效率。光伏利用率 r_{pv} 可表示为^[10]

$$r_{pv} = \frac{\sum Q_{PV,L} + \sum Q_{PV,bat} + \sum Q_{PV,PCM} + \sum Q_{PV,grid}}{\sum Q_{PV}} \times 100\%, (1)$$

式中: $\sum Q_{PV}$ 为光伏系统总发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\sum Q_{PV,L}$ 为光伏发电直接为建筑内电负荷供电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\sum Q_{PV,bat}$ 为光伏发电给蓄电池充电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\sum Q_{PV,PCM}$ 为光伏发电给相变储能充电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $\sum Q_{PV,grid}$ 为光伏发电上网电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

1.1.2 蓄电池充放电模型

蓄电池是光伏发电系统中不可缺少的重要器件,用于贮存光伏板发出的电能,可弥补太阳能发电的波动性和不确定性^[11]。本研究中蓄电池用于贮存光伏发电的富余电量。

光伏系统蓄电池的充放电与储能的荷电状态有关,其荷电状态在时序上具有连续性,是充放电功率累积得到的,单位时间间隔 Δt 内蓄电池输出功率前后的荷电状态为

$$S_{bat}(t) = S_{bat}(t-1) + P_{bat}(t), (2)$$

式中: $S_{bat}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的荷电状态; $P_{bat}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的充放电功率,充电时为正数,放电时为负数。

1.2 PCM 模型

PCM 是用相变材料在发生相变过程中吸收或释放大潜热,以实现能量的存储和释放。PCM 具有储热密度大、储热装置体积小、热效率高、吸热放热温度恒定、易于控制、绿色环保、使用安全等优点。

在考虑 PCM 的建筑光伏系统中,当光伏出力过剩或在用电低谷时段,PCM 系统相当于电-热耦合负载,储存富余或廉价的电能;当光伏出力不足或在用电高峰时段,PCM 系统相当于热源代替空调,调节建筑室内温度。在本研究中,考虑到需要满足冬季储热和夏季储冷的双重需求,采用混合比例为 0.6:0.4 的癸酸与月桂酸复合相变材料,其相变温度为 18°C ,以实现室内温度冬季保持在 $12\sim 18^\circ\text{C}$,夏季 $18\sim 24^\circ\text{C}$ ^[6]。

由于本文研究是针对电力网的平衡与优化,因此不具体计算建筑热负荷需求,将其折算为电负荷,将 PCM 的释能过程体现为放电状态。PCM 系统的储能状态可表示为

$$S_{PCM}(t) = S_{PCM}(t-1) + H_{PCM}(t)\Delta t, (3)$$

式中: $S_{PCM}(t)$, $S_{PCM}(t-1)$ 表示 t 时刻、 $t-1$ 时刻 PCM 系统的储能状态; $H_{PCM}(t)$ 表示 t 时刻 PCM 系统的充放热功率,充电时为正数,释能时为负数。

1.3 热泵模型

建筑 PCM 系统的热力输入由热泵消耗电能转化得到,因此,热泵消耗电功率和热力负荷通过建筑 PCM 系统实现了电热耦合

$$H_{PCM}(t) = C_{eh} P_{HP}(t), (4)$$

式中: C_{eh} 表示热泵的热电转换系数,取值为 2.6; $P_{HP}(t)$ 表示 t 时刻热泵的功率。

2 需求响应模型及优化调度策略

需求响应是一种能够改变电力用户固有的电力消费习惯和模式的供需互动行为,实现削峰填谷,能够有效解决供需不平衡问题,减少用电高峰时段所需配电系统成本的提高,增加用电低谷时段负荷利用率,提高电网运行效率,优化资源配置,是协调投资效益与电网运行的有效措施^[12]。

需求响应可大致分为基于价格的需求响应和基于激励的需求响应 2 大类,如图 3 所示。基于价格的需求响应是指用户依据电价的不同合理调整自身用电时间,充分利用低价时段,从而减少电费支出。基于激励的需求响应是指制定可行的激励政策,激励用户在系统可靠性受到威胁时及时作出反应削减负荷。本文采用分时电价的需求响应进行分析。



图 3 需求响应分类

Fig. 3 Classification of demand responses

2.1 分时电价模型

分时电价即根据每天的用电量,将一天 24 h 分为峰、平、谷 3 种阶段,对每个阶段制定不同的电价。

分时电价是引用需求响应的重要措施之一,该方法体现了电能作为商品在供不应求(负荷高峰)时的价值,根据不同时段用电负荷特性采用不同价格,引导用户根据自身用电方式的可调性和利益调整用电时间、用电方式,进而改变负荷曲线。采用分时电价的需求响应关键在于合理制定电价,峰谷电价比过高会导致用户响应过度,高峰时段负荷急剧下降,低谷时段负荷急剧增加,严重时会造成系统峰谷倒置。峰谷电价比过低会导致用户响应不足,无法达到削峰填谷的预期效果^[13-14]。

电价的变化必然引起用户电量的变化,电价变化量与电量变化量的关系用电价弹性系数来表示,可分为自弹性系数和交叉弹性系数。

自弹性系数可表示为

$$k_{ii} = \frac{\Delta P_i / P_i}{\Delta e_i / e_i}, \quad (5)$$

式中: ΔP_i , P_i 为第*i*时段分时电价后电量的变化量和分时电价前的电量; Δe_i , e_i 为第*i*时段分时电价后的电价变化量和分时电价前的电价。

交叉弹性系数可表示为

$$k_{ij} = \frac{\Delta P_i / P_i}{\Delta e_j / e_j}, \quad (6)$$

式中: $i \neq j$; $\Delta e_j / e_j$ 为*j*时刻,分时电价后的电价变化量和分时电价前的电价。

构造电价弹性矩阵 K ,即

$$K = \begin{bmatrix} k_{ff} & k_{fp} & k_{fg} \\ k_{pf} & k_{pp} & k_{pg} \\ k_{gf} & k_{gp} & k_{gg} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: f, p, g 分别表示电力负荷峰、平、谷时段。则分时电价后各时段的负荷为

$$\begin{bmatrix} P_{Lf} \\ P_{Lp} \\ P_{Lg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Lf}^{(0)} \\ P_{Lp}^{(0)} \\ P_{Lg}^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{Lf}^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & P_{Lp}^{(0)} & 0 \\ 0 & 0 & P_{Lg}^{(0)} \end{bmatrix} \cdot K \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta e_f}{e_f} \\ \frac{\Delta e_p}{e_p} \\ \frac{\Delta e_g}{e_g} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: $P_{Lf}^{(0)}, P_{Lp}^{(0)}, P_{Lg}^{(0)}$ 分别为采用分时电价前峰、平、谷各时段负荷; P_{Lf}, P_{Lp}, P_{Lg} 分别为采用分时电价后峰、平、谷各时段负荷; $\Delta e_f, e_f, \Delta e_p, e_p, \Delta e_g, e_g$ 分别为峰、平、谷时刻分时电价后的电价变化量和分时电价前的电价。

在本研究中,建筑室内温度调节由空调和PCM系统根据光伏系统出力和峰、平、谷时段协调调节,因此将电负荷分为温度调节负荷和非温度调节负荷,非温度调节负荷参与上述分时电价需求响应。

2.2 需求响应运行策略

(1)光伏系统出力大于负荷。无论峰、平、谷时段,均采用空调调节建筑室内温度,光伏系统为负荷供电,多余电量给蓄电池充电,若蓄电池已充满,给PCM充电,若仍有余电,多余光伏上网。

(2)光伏系统出力小于负荷。电价高峰、平时段,分2种情况:1)若PCM系统无电,采用空调调节建筑室内温度,电负荷不变,净光伏、蓄电池供电,电量不足,从主网购电;2)若PCM系统有电,关闭空调,由PCM系统调节建筑室内温度,电负荷减少,电负荷值更新。光伏系统出力大于新负荷值,光伏系统为负荷供电,多余电量给蓄电池充电,若蓄电池已充满且仍有余电,多余光伏电量上网。光伏系统出力仍无法满足负荷,净光伏、蓄电池供电,电量仍不足,从主网购电。电价低谷时段,采用空调调节建筑室内温度,光伏系统供电,不足电量从主网购电,并对蓄电池和PCM系统充电直至充满。

3 优化模型

3.1 目标函数

本文以天为调度周期,假设短时间内光伏系统输出功率变化不大,以成本最小化为目标建立目标函数^[13]

$$\min C_{\text{day}} = C_{\text{pv}} + C_{\text{bat}} + C_{\text{HP}} + C_{\text{PCM}} + C_{\text{op}} + C_{\text{grid}} - C_{\text{PV}_{\text{grid}}} - C_s, \quad (9)$$

$$C_{\text{op}} = C_{\text{op}}^{\text{pv}} + C_{\text{op}}^{\text{bat}} + C_{\text{op}}^{\text{PCM}}, \quad (10)$$

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^{24} e_t P_{\text{grid}}(t), \quad (11)$$

$$C_{\text{PV}_{\text{grid}}} = \sum_{t=1}^{24} e_{\text{pv}} P_{\text{PV}_{\text{grid}}}(t), \quad (12)$$

$$C_s = \sum_{t=1}^{24} e_s P_{\text{pv}}(t), \quad (13)$$

式中: $C_{\text{pv}}, C_{\text{bat}}, C_{\text{HP}}, C_{\text{PCM}}$ 分别为光伏系统、蓄电池、热泵和PCM系统在回收年限内的平均日投资成本; C_{op} 为系统每天的运行维护成本,其中包括光伏系统、蓄电池和PCM系统每天的维护成本 $C_{\text{op}}^{\text{pv}}, C_{\text{op}}^{\text{bat}}, C_{\text{op}}^{\text{PCM}}$; C_{grid} 为微网从电网购电成本; $C_{\text{PV}_{\text{grid}}}$ 为光伏系统上网收益; C_s 为光伏补贴; e_t 为*t*时段系统的购售电价; $P_{\text{grid}}(t)$ 为*t*时段微网从电网购电功率; $P_{\text{PV}_{\text{grid}}}(t)$ 为光伏系统上网功率; e_s 为光伏补贴电价; $P_{\text{pv}}(t)$ 为光伏发电功率。

3.2 约束条件

3.2.1 微网运行功率平衡约束

$$P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_L(t) + P_H(t) + P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{PCM}}(t) + P_{\text{PV}_{\text{grid}}}(t), \quad (14)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为光伏发电功率; $P_{grid}(t)$ 为微网从电网购电功率; $P_L(t)$ 为微网电负荷; $P_H(t)$ 为由 PCM 系统释能调节室内温度的等效电能; $P_{bat}(t)$ 为蓄电池充放电功率; $P_{PCM}(t)$ 为 PCM 系统充放电功率, 当由 PCM 系统释能调节室内温度时 $P_H(t) + P_{PCM}(t) = 0$ 。

3.2.2 微网与电网交互功率约束

为确保电网与建筑微网可靠稳定运行, 需确保光伏并网系统与电网间的交互功率在系统允许的范围内, 则

$$-P_{grid, max} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid, max}, \quad (15)$$

式中, $P_{grid, max}$ 为系统与电网交互功率的最大允许值。

3.2.3 蓄电池充放电状态约束

蓄电池过度充放电会影响其寿命, 增加更换和运维成本, 因此需对蓄电池充放电过程中的功率以及荷电状态进行约束, 则

$$\begin{cases} S_{bat, min} \leq S_{bat} \leq S_{bat, max} \\ S_{bat}(t_N) = S_{bat}(t_0) \\ -P_{bat, max} \leq P_{bat} \leq P_{bat, max} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $S_{bat, max}$, $S_{bat, min}$ 为蓄电池荷电状态的上限和下限(放电深度); $S_{bat}(t_0)$, $S_{bat}(t_N)$ 为蓄电池荷电状态的初值和周期末值, 蓄电池需满足在运行 1 个周期后恢复到原来的电储量; $P_{bat, max}$ 为蓄电池充放电功率最大允许值, 选取单位时间内最大充放电功率为蓄电池额定容量的 20%; $S_{N, bat}$ 为蓄电池的额定容量。

3.2.4 PCM 系统运行状态约束

由于本研究不考虑 PCM 系统释能是的热力网, 并将其释能过程的热量折算为 PCM 系统电量的消耗, 其运行状态约束条件与蓄电池充放电约束条件相似, 则

$$\begin{cases} S_{PCM, min} \leq S_{PCM} \leq S_{PCM, max} \\ S_{PCM}(t_N) = S_{PCM}(t_0) \\ -H_{PCM, max} \leq H_{PCM} \leq H_{PCM, max} \end{cases}, \quad (17)$$

式中: $S_{PCM, max}$, $S_{PCM, min}$ 为 PCM 系统所存容量的上、下限, 系统在进行储能或释能的同时, 装置内的相变材料也在随之发生相变, 系统所储存的容量不得超过储能系统容量限值, 否则相变过程完成后, 相变材料会继续储能/释能, 发生温度急剧上升/下降; $S_{PCM}(t_0)$, $S_{PCM}(t_N)$ 为 PCM 系统容量的初值和周期末值, 储能系统在运行 1 个周期后, 储能状态应恢复到原来的储热量; $H_{PCM, max}$ 为 PCM 系统充放电功率最大允许值, 选取单位时间内最大充放电功率为 PCM 系统额定容量的 25%; $S_{N, PCM}$ 为 PCM 系统的额定容量。

3.2.5 时段负荷约束

在实施需求响应后, 峰谷时段不能倒置, 即

$$\max_{t \in t_g} P_L(t) < \min_{t \in t_f} P_L(t). \quad (18)$$

3.2.6 经济成本约束

在建筑光伏系统中引入 PCM 和需求响应机制后, 应保证用户从电网购电的成本不增加, 系统运行的日平均成本不增加, 则

$$\sum_{t \in t_f} e_f P_{grid}(t) + \sum_{t \in t_p} e_p P_{grid}(t) + \sum_{t \in t_g} e_g P_{grid}(t) \leq \sum_{t \in T} e_0 P_L(t), \quad (19)$$

$$C_{day} \leq C'_{day}, \quad (20)$$

式中: t_f, t_p, t_g 为分时电价下峰、平、谷各时段; e_f, e_p, e_g 为分时电价后峰、平、谷各时段电价; e_0 为采用分时电价前的电价; C'_{day} , C_{day} 为引入 PCM 系统和需求响应前、后日平均成本。

4 算例分析

4.1 系统数据

以某地某一分布式光伏并网系统为例, 在某建筑屋顶以最佳倾斜角和最小间距安装光伏板, 确保板间无阴影遮挡。光伏系统安装容量 1 000 kW, 寿命为 20 a。蓄电池选用铅酸蓄电池, 寿命为 10 a。PCM 系统选用癸酸和月桂酸混合的复合相变材料, 比例为 0.6:0.4, 复合材料单价为 179.056 元/(kW·h), 寿命为 30 a。

根据大部分地区分布式光伏并网政策, 分布式光伏上网电价为 0.40 元/(kW·h), 光伏补贴电价为 0.32 元/(kW·h)。根据已实施的分时电价政策, 设定峰、平、谷各时段及电价见表 1。采用分时电价前的电价为 0.50 元/(kW·h)。

表 1 分时电价

Tab. 1 Time-of-use electricity price

负荷类别	时段	分时电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]
峰	(08:00,12:00]∪(18:00,23:00]	0.8
平	(07:00,08:00]∪(12:00,18:00]	0.6
谷	(23:00,24:00]∪(00:00,07:00]	0.3

该建筑典型日光伏出力曲线、电负荷曲线以及温控负荷曲线如图 4 所示。

4.2 结果分析

本算例采用粒子群算法, 在 Matlab 中进行仿真与建模计算。根据本算例系统的基础数据, 储能系统的优化配置结果为, 蓄电池容量选取 200 kW·h, PCM 容量为 2 300 kW·h。

在引入需求响应和 PCM 后的建筑光伏一体化系统中, 其能量调度如图 5—7 所示。分布式光伏发电所发电量优先满足建筑内电负荷需求, 其次电量用于给蓄电池和 PCM 系统充电, 余电上网, 如图 5 所示。如图 6 所示, 电负荷包括建筑内非温控负荷, 空

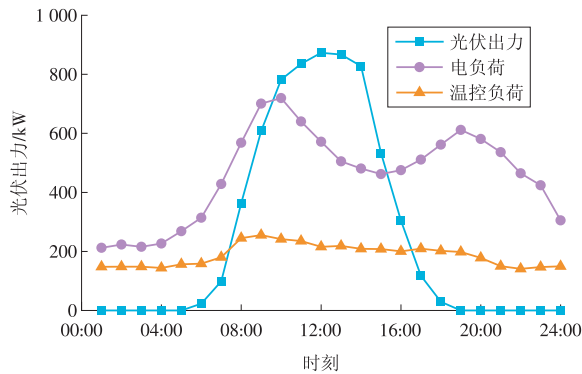


图4 微网光伏出力及负荷曲线

Fig. 4 Photovoltaic output and load curves of the micro-grid

调负荷,以及夜间给蓄电池和PCM系统充电所需负荷。如图7所示,PCM白天吸收光伏系统多余电量并在夜间用电低谷时期以低电价充电,08:00—09:00和16:00—23:00的用电高峰时段释能,代替空调调节室内温度,以减少高峰时段的电负荷,实现削峰填谷。

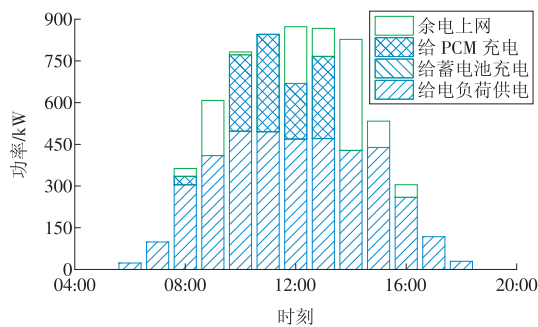


图5 光伏发电去向

Fig. 5 Consumers of PV power

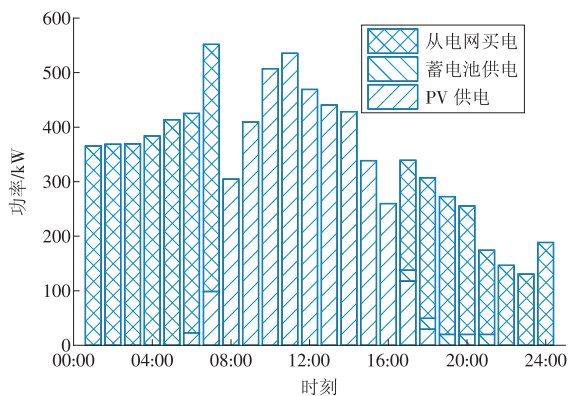


图6 电负荷组成

Fig. 6 Electrical load composition

为验证本文研究方案的优越性,设立了5种资源配置方案,并进行分析比较。

(1)方案1,系统无任何配置,所需电负荷均由电网提供。

(2)方案2,系统仅配置分布式光伏发电,无需求响应,无PCM。

(3)方案3,系统同时配置分布式光伏发电和需

求响应,无PCM。

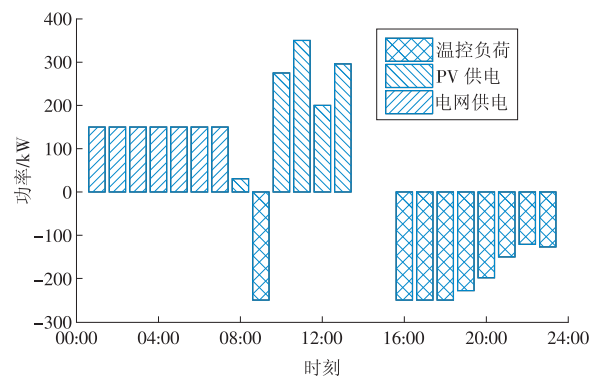


图7 PCM功率分布

Fig. 7 PCM power distribution

(4)方案4,系统同时配置分布式光伏发电和相变储能,无需求响应。

(5)方案5,系统同时配置分布式光伏发电、相变储能和需求响应。

5种资源配置方案下的电负荷、与电网交换功率如图8—9所示,各种方案下的光伏消纳率、峰谷差、日成本以及满意度见表2。在建筑屋顶铺设光伏板,满足建筑内用电需求,成本由5474.72元/d降至1631.68元/d,但存在光伏发电与电负荷不匹配的现象,使得光伏消纳率较低,且无法改变建筑负荷曲线,无法实现削峰填谷,电负荷峰谷差与原系统的峰谷差相同均为513.269 kW。

方案3与方案4分别引入需求响应和PCM,可以实现一定的削峰填谷,与单独采用PCM方案的峰谷差为513.269 kW相比,单独采用需求响应的峰谷差为431.357 kW,效果更明显,效果更好,但二者结合后进一步降低了峰谷差为349.485 kW,负荷曲线更趋于平稳。

仅引入需求响应方案中,峰谷差可以大幅度减小,且可以减少每日成本支出,但白天峰时电负荷向夜间低谷时段的转移使得光伏消纳率降低。而仅引入PCM的方案,虽然可以大幅度提高光伏消纳率,但由于与空调配合调节室内温度,且为了更多地消纳光伏,减少成本支出,对峰谷差的调节并无明显效果,且成本减少效果并不明显。

如图9所示,同时引入需求响应和PCM的方案五,通过PCM消纳白天冗余的光伏发电量,将光伏消纳率由原来的81.39%提高到88.83%,同时,通过在夜间用电低谷时段充电,用于代替负荷高峰时段的空调调节建筑温控负荷,使得峰谷差由513.269 kW降至349.485 kW,大大提高了系统技术指标的满意度。

由于PCM材料价格低廉,且充分利用电价低谷

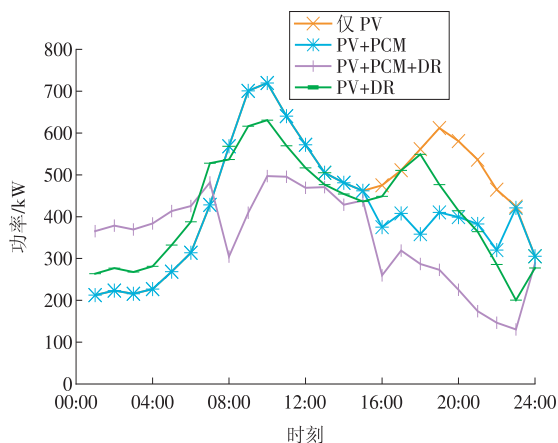


图 8 电负荷曲线

Fig. 8 Electrical load curve

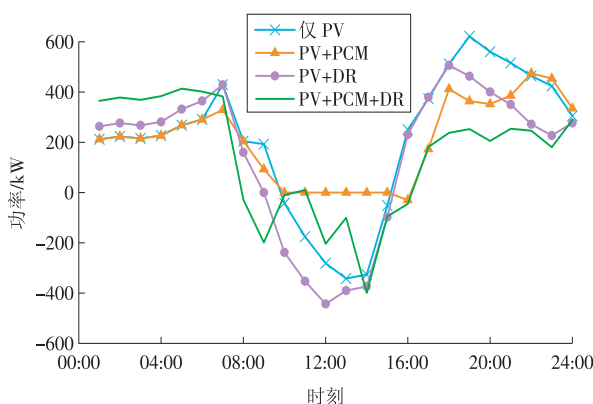


图 9 微网与电网交换功率曲线

Fig. 9 Exchange power between the micro-grid and the power grid

表 2 评价指标

Tab. 2 Evaluation indicators

方案	光伏消纳率/%	峰谷差/ kW	日成本/ (元·d ⁻¹)	满意度/%
无配置	0	513.269	5 474.72	23
仅 PV	81.39	513.269	1 631.68	37
PV+DR	72.31	431.357	1 329.21	46
PV+PCM	97.45	512.587	1 659.52	53
PV+PCM+DR	88.83	349.485	762.29	60

注: DR 为需求响应; PV 为光伏系统。

时段充电以减少高电价时段用电成本,该方案的每日成本仅 762.29 元,不足方案 2 仅配置光伏系统每日所需成本的 50%,无论从经济上还是技术上,该方案都取得了很好的效益。

5 结论

本文构建了考虑 PCM 的建筑光伏系统,同时引入需求响应,建立系统储能容量优化模型,通过算例分析可得出如下结论。

(1) 考虑 PCM 的建筑光伏系统可以大幅度提高系统光伏消纳率,减少弃光现象,引入需求响应又

进一步降低负荷峰谷差。

(2) 需求响应和 PCM 同时引入建筑光伏系统,效果更明显,具有可观的经济性和技术性。

参考文献:

- [1] 周楠,樊玮,刘念,等.基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J].电网技术,2016,40(6):1709-1716.
ZHOU Nan, FAN Wei, LIU Nian, et al. Battery storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV based microgrid considering demand response [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [2] 彭政,崔雪,王恒,等.考虑储能和需求侧响应的微网光伏消纳能力研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(22):63-69.
PENG Zheng, CUI Xue, WANG Heng, et al. Research on the accommodation of photovoltaic power considering storage system and demand response in microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 63-69.
- [3] 徐志成,赵波,丁明,等.基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J].中国电机工程学报,2016,36(6):1578-1587.
XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distribution networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1578-1587.
- [4] 杨天蒙,韩震焘,史喆,等.能源互联网系统中复合储能协调优化配置方法研究[J].电测与仪表,2021,58(5):8-13.
YANG Tianmeng, HAN Zhentao, SHI Zhe, et al. Coordinated optimal configuration method of hybrid energy storage in Energy Internet system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 8-13.
- [5] 倪平波,周丹,朱海萍,等.智能楼宇中的电-热储能系统双层优化配置模型研究[J/OL].电测与仪表,2020:1-7 (2020-01-21) [2021-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200121.1017.006.html>.
NI Pingbo, ZHOU Dan, ZHU Haiping, et al. Research on double layer optimal configuration model of electric-thermal energy storage system in smart building [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020: 1-7 (2020-01-21) [2021-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200121.1017.006.html>.
- [6] 魏繁荣,林湘宁,陈乐,等.基于建筑相变材料储能的微网综合能源消纳系统研究[J].中国电机工程学报,2018,38(3):792-804.
WEI Fanrong, LIN Xiangning, CHEN Le, et al. Microgrid comprehensive energy consumption system based on phase change building materials [J]. Proceedings of the CSEE,

- 2018,38(3):792-804.
- [7]李艳,胡志豪,随权,等.考虑风光热不确定性和相变储能系统的城市建筑微网电-热联合调度[J].电网技术,2019,43(10):3687-3697.
- LI Yan, HU Zhihao, SUI Quan, et al. Microgrid joint electro thermal scheduling for phase change energy storage system of urban buildings considering uncertainty of wind, light and heat [J]. Power System Technology, 2019, 43 (10) : 3687-3697.
- [8]左伟杰,马钊,周莉梅,等.基于配电网电能质量健康评估策略的分布式光伏接入方法[J].电网技术,2015,39(12):3442-3448.
- ZUO Weijie, MA Zhao, ZHOU Limei, et al. Grid-connection of distributed photovoltaic generation method based on the power quality health status of distribution system [J]. Power System Technology, 2015, 39 (12) : 3442-3448.
- [9]卞阳,赵奇剑,胡水军,等.基于云平台的智能配电网电能质量监测预警研究与应用[J].华电技术,2021,43(1):31-37.
- BIAN Yang, ZHAO Qijian, HU Shuijun, et al. Research and application on power quality monitoring and warning of intelligent power distribution network based on cloud platform [J]. Huadian Technology, 2021, 43 (1) : 31-37.
- [10]马剑,狄开丽,李锐.提高微网光伏消纳率的价格激励需求响应分层优化方法[J].中国电力,2016,49(8):99-105.
- MA Jian, DI Kaili, LI Rui. Hierarchical optimization method of price incentive demand response for improving photovoltaic absorption rate of microgrid [J]. Electric Power, 2016, 49 (8) : 99-105.
- [11]董慧峰,李文启,牛文迪,等.电池储能系统参与电网削峰填谷实用算法[J].电测与仪表,2019,56(18):74-78.
- DONG Huifeng, LI Wenqi, NIU Wendi, et al. Practical algorithm applied in peak load shifting of battery energy storage system in power grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56 (18) : 74-78.
- [12]孔祥玉,杨群,穆云飞,等.分时电价环境下用户负荷需求响应分析方法[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(10):75-80.
- KONG Xiangyu, YANG Qun, MU Yunfei, et al. Analysis method of user load demand response under time-of-use electricity price environment [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27 (10) : 75-80.
- [13]孙秀娟,张鹏飞,卞晓雪.计及多类型需求响应的光伏微网储能容量优化配置[J].科学技术与工程,2019,19(9):108-114.
- SUN Xiujuan, ZHANG Pengfei, BIAN Xiaoxue. Optimal allocation of energy storage capacity of photovoltaic microgrid considering multiple types of demand responses [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (9) : 108-114.
- [14]冯丽,李俊,刘波.清洁能源消纳背景下的重庆电网需求响应实践[J].华电技术,2021,43(1):71-75.
- FENG Li, LI Jun, LIU Bo. Demand response of Chongqing power grid integrated with clean energy consumption [J]. Huadian Technology, 2021, 43 (1) : 71-75.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

王秋惠(1987—),女,吉林吉林人,工程师,硕士,从事新能源管理方面的工作(E-mail:wangqiuahui@ssecc.com.cn)。

孙立国(1973—),男,辽宁朝阳人,高级工程师,从事发电厂及电力系统安全经济稳定运行方面的工作(E-mail:15844019872@163.com)。

李佳雯*(1997—),女,吉林吉林人,在读硕士研究生,从事综合能源系统规划运行方面的研究(E-mail:ljwen_0428@163.com)。