

# 考虑负荷优化的光储充电站储能经济性配置研究

许 强,王 维,吉同舟,徐衍微

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

**[摘要]** 为缓解电动汽车充电对电网的冲击,提升充电站的经济性,对光储一体化充电站储能配置展开研究. 首先分析了充电站电动汽车的负荷特性,结合峰谷电价,制定了储能运行策略. 然后通过建立储能配置双层规划模型,保证了充电站负荷最大程度优化的同时实现价格套利. 最后通过算例分析,得到商业区充电站储能经济性配置方案. 将该配置方案与以峰谷差作为优化指标的传统储能配置方案对比,结果表明该方案有效增加了总削峰量,并将充电站年购电成本进一步降低.

**[关键词]** 储能配置,峰谷电价,储能运行策略,双层规划,负荷优化

**[中图分类号]** TM76 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2021)02-0015-07

## Research on Energy Storage Economic Allocation of Photovoltaic and Energy-Storage Integrated Charging Station Considering Load Optimization

Xu Qiang, Wang Wei, Ji Tongzhou, Xu Yanwei

(NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In order to cushion the blows of electric vehicles charging on the power grid and improve the economy of charging station, the energy storage configuration of photovoltaic and energy-storage integrated charging station is studied. Firstly, this paper analyzes the load characteristics of electric vehicles in charging station, and the energy storage operation strategy is formulated on the basis of the peak valley electricity price. Then, a bi-level programming model of energy storage configuration is established to ensure the maximum optimization of charging station load and realize price arbitrage. Finally, through the analysis of an example, the energy storage economic configuration scheme of charging station in commercial district is obtained. Compared with the traditional energy storage configuration scheme with peak valley difference as the optimization index, the results show that the proposed scheme effectively increases the total peak load shifting amount and further reduces the annual power purchase cost of the charging station.

**Key words:** energy storage allocation, peak valley electricity price, energy storage operation strategy, bi-level programming model, load optimization

近年来电动汽车(electric vehicle, EV)在节能减排方面相比传统燃油车有着巨大的优势,因此得到广泛推广. 随着电动汽车保有量的增加,电动汽车的充电需求逐渐增长,其配套设施建设也日趋完善. 然而,对于一个规模化的公共充电站而言,大量电动汽车同时涌入充电会对电网的安全稳定运行造成较大的影响<sup>[1-2]</sup>. 加装储能装置能够有效消除峰谷差<sup>[3]</sup>,平滑功率波动<sup>[4-5]</sup>,提高供电可靠性<sup>[6]</sup>,可以在满足充电需求的同时减少对电网的影响.

受制于储能电池价格的影响,储能系统的配置效益尤为重要. 目前已有大量学者对充电站储能经济性配置展开研究. 文献[7]建立了储能投资和运营成本模型,研究结果表明在公交车快速充电站配置储能可以将总成本减小 22.85%. 文献[8]建立了电池寿命损耗模型以寻求充电站储能的经济性配置. 文献

收稿日期:2020-12-25.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51807095)、江苏省高校自然科学面上项目(18KJB470016).

通讯作者:王维,博士,副教授,研究方向:无线电能传输技术、线路感应取能技术、综合能源系统优化运行与评估、高频电力电子变换技术. E-mail:61207@njnu.edu.cn

[9-10]利用排队理论评估充电站的合理容量配置. 文献[11]利用多目标优化模型,计算得到不同光伏配比和充电桩功率等级下的经济容量. 上述文献在储能配置的研究上取得了一定的成果,但是传统以负荷峰值<sup>[8-10]</sup>、峰谷差率<sup>[11]</sup>为优化指标的配置模型中储能的利用率仍旧偏低,储能配置的经济性有进一步提升的空间.

充电站作为电动汽车充电的主要载体之一,站内的充电负荷是储能配置的关键指标,这影响到储能配置的经济性. 因此,本文首先分析了充电站电动汽车负荷特性,并且给出峰谷电价场景下储能充放电策略. 接着以充电站年净利润最大为目标,兼顾储能出力优化,综合考虑充电站的运营利润、建设维护成本、政府补贴等因素,建立了基于双层规划的储能配置模型. 最后通过算例求解出充电站最佳容量配置,并将该配置方案与传统配置方案展开对比,验证了模型的有效性.

## 1 光储充电站结构与电动汽车负荷分析

光储充电站是实现光伏、储能、充电互相协调支撑的一种高科技绿色充电站,主要由配电网系统、光伏发电系统、储能系统、充电桩、AC/DC 变换器、DC/DC 变换器、能量管理系统等部分组成,其结构如图 1 所示.

充电站的电动汽车负荷特性很大程度上影响到储能容量的配置,所以有必要对充电站的电动汽车负荷进行分析. 文献[12]的研究结果表明,充电站的负荷与用户的生活习惯、日常出行规律、行驶里程等关系较为密切. 本文以某商业区公共充电站为例,经过对该充电站的负荷采集发现,该充电站的日负荷分布呈现明显的规律性. 因此,可以通过对该充电站电动汽车实际的充电负荷进行分析,结合负荷特性对储能配置展开研究.

图 2 给出了某典型日充电站站内电动汽车负荷和商业区基本负荷的分布. 从站内电动汽车负荷的时序分布可知,车站内负荷的高峰期主要集中在上下班之后,表明了充电站负荷与居民生产生活之间的紧密联系. 接着,由站内电动汽车负荷分布与商业区基本负荷分布的对比可知,充电站站内电动汽车负荷不仅符合居民的日常出行规律,也与商业区基本负荷的峰谷时段基本一致. 商业区基本负荷和充电站日负荷高峰期主要集中在 09:00—13:00 以及 17:00—21:00 这两个时间段,负荷高峰时段的重合会导致该区域配电网“峰上加峰”. 此外,由于充电站实行统一充电价格,负荷高峰期间,充电站购电成本较高,大量电动汽车集中在负荷高峰期间充电,增加了充电站的购电成本,一定程度上影响了充电站的收益. 所以可以利用电网峰谷电价和储能系统降低充电站负荷对区域配电网的影响,以减少充电站的购电成本.

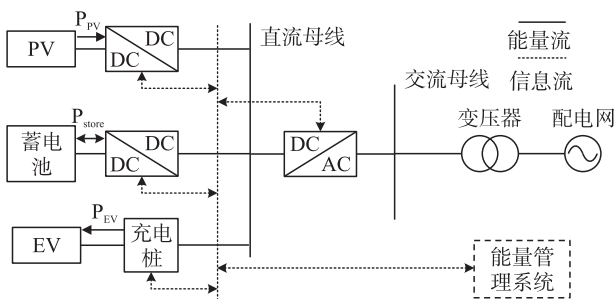


图 1 光储充电站结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of photovoltaic and energy-storage integrated charging station

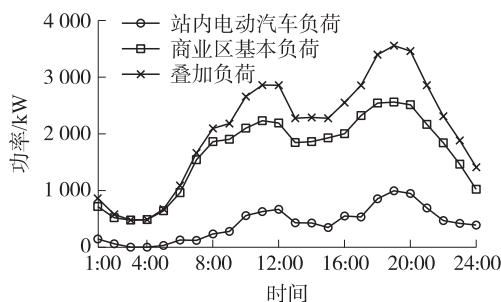


图 2 电动汽车负荷对商业区配电网的影响

Fig. 2 Influence of EV load on distribution network in business district

## 2 峰谷电价下的储能运行策略

由上一节分析可知,充电站内电动汽车负荷高峰与商业区基本负荷高峰时期重合,结合站内电动汽车负荷特性,为充分发挥储能系统的经济效应,本文根据峰谷电价制定了相应的储能运行策略,策略设计原则如下:(1)合理利用峰谷电价来提升充电站经济效益。(2)辅助配电网“削峰填谷”,尽可能减小电动汽车负荷对区域配电网的不利影响.

储能的运行策略如图 3 所示. 依据峰谷电价将一天划分为峰、谷、平 3 个时段. 充电站能量管理系统

实时监测当前时段的电动汽车负荷、光伏出力、储能单元的荷电状态(state of charge, SOC). 储能系统运行策略的核心是“低储高发”,不同的时段采取不同的运行策略. 在谷时段,充电站负荷与配电网负荷处于较低水平,光伏几乎没有出力,此时段电价较低,可以从电网购电,存储在蓄电池内. 在平时段,储能的运行状态参考光伏出力,白天有光伏出力时,储能尽可能地吸收光伏能量. 如果光伏出力不足,且储能没有达到荷电上限,剩下的电能通过电网补充. 夜间无光伏出力时,储能系统处于浮充状态,不充电也不放电. 在峰时段,储能配合光伏,最大化地向电动汽车提供能量.

### 3 储能配置双层规划模型

储能配置既要考虑充电站的投资建设成本,又要考虑储能系统对电动汽车负荷的优化. 储能的容量越大,对于电动汽车负荷的平抑效果越好,但是充电站的建设成本也会增加,所以实现充电站储能系统的经济运营需要综合考虑充电站的各项建设成本和收益,以及储能系统的优化运行. 本节利用双层规划理论建立储能系统优化模型,通过上下层的动态博弈,以获得充电站储能配置的最优解.

#### 3.1 上层规划模型

上层规划的目标是充电站年收益最大,需要综合考虑各项成本和收益,主要包括充电站建设成本、维护成本、运营收益、政府补贴 4 个因素. 上层目标函数  $F_{up}$  为

$$F_{up} = \max(I - C_1 - C_2 + S). \quad (1)$$

式中,  $I$  表示充电站运营收益年值,  $C_1$  表示充电站建设成本年值,  $C_2$  表示充电站维护成本年值,  $S$  表示政府补贴. 其中,

$$I = 260 \times \left( \sum_{t=1}^T [P_{ev,t} x_s \Delta t - P_{l,t} x(t) \Delta t] + \sum_{t \in K} (P_{ev,t} - P_{l,t}) x_e \Delta t \right), \quad (2)$$

$$C_1 = (C_f + Q_{pv} C_{pv} + n C_{pile}) \times \frac{r(1+r)^{m_1}}{(1+r)^{m_1} - 1} + (C_e E + C_p P_{max}) \times \frac{r(1+r)^{m_2}}{(1+r)^{m_2} - 1} r m_1 m_2, \quad (3)$$

$$C_2 = (C_e E + C_p P_{max}) k_{es} + Q_{pv} k_{pv}. \quad (4)$$

式(2)表示充电站运营收益,包括光储系统充放电套利、电网公司对充电站降峰的激励. 其中,  $P_{ev,t}$  和  $P_{l,t}$  分别是电动汽车负荷和充电站负荷净值,  $x_s$ 、 $x(t)$  和  $x_e$  分别是充电费、 $t$  时刻购电电价和峰时段充电站降峰补贴,  $T$  表示全天的优化时段数,  $K$  表示峰值时段. 考虑到站内日充电负荷和光伏的波动,对于充电站的收益估计取 260 个近似日<sup>[13]</sup>,等效得到充电站运营利润年值. 式(3)表示充电站建设成本,其中,  $C_f$  为充电站投资固定成本,  $C_{pv}$  为光伏单元单价,  $Q_{pv}$  为光伏配置额定容量,  $C_{pile}$  为充电桩单价,  $n$  为充电站内充电桩个数,  $C_e$  和  $C_p$  分别为单位容量储能电池的价格和功率转换装置的单价,  $E$  和  $P_{max}$  分别为储能系统容量和最大充放电功率,  $r$  为贴现率,  $m_1$  和  $m_2$  分别为光伏系统寿命年限和储能系统寿命年限. 式(4)表示充电站维护成本,其中,  $k_{es}$  为储能系统年运行维护系数,  $k_{pv}$  为光伏系统年运行维护系数. 此外,储能系统有政府提供的一次性的建设性补贴<sup>[13]</sup>,假设补贴资金为储能系统一次性投入的 30%.

#### 3.2 下层规划模型

下层规划的目标是储能充放电功率优化,抑制充电站引起的区域配电网峰谷差以及减少充电站的购电成本. 下层规划模型的目标函数:(1)优化时间段内配电网负荷曲线方差最小. (2)充电站日购电成本

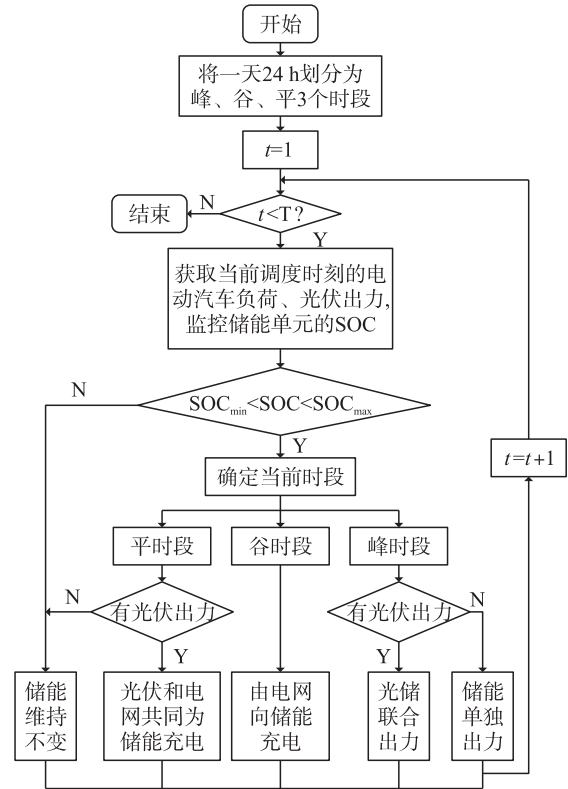


图3 储能运行策略流程图

Fig. 3 Flow chart of energy storage operation strategy

最低.

$$\begin{cases} f_1 = \min \frac{\sum_{t=1}^T (P_{s,t} - P_{\text{avg}})^2}{T}, \\ f_2 = \min \sum_{t=1}^T P_{1,t} x(t). \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $P_{s,t}$  是区域配电网  $t$  时刻的负荷值,  $P_{\text{avg}}$  是区域配电网一天内负荷曲线的平均值.

下层规划模型是双重目标优化问题, 可将  $f_1$  和  $f_2$  做归一化处理, 将其转化为单目标函数. 具体方法为

$$\min F_{\text{down}} = \min(\omega_1 f_1 / f_{1\max} + \omega_2 f_2 / f_{2\max}). \quad (6)$$

式中,  $f_{1\max}$  是 24 h 内区域配电网的最大方差,  $f_{2\max}$  是充电站一天内最大的购电成本,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为  $f_1$  和  $f_2$  的权重系数, 本文设定对于区域配电网的负荷方差和日购电成本同等权重, 即  $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ .

### 3.3 约束条件

#### (1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{s,t} = P_{1,t} + P_{\text{base},t}, \\ P_{1,t} = P_{\text{ev},t} - P_{\text{pv},t} + P_{\text{b},t}. \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $P_{\text{base},t}$  为  $t$  时刻商业区基本负荷,  $P_{\text{pv},t}$  为  $t$  时刻的光伏出力,  $P_{\text{b},t}$  为储能系统  $t$  时刻的充放电功率. 当充放电功率为负时, 储能处于放电状态, 当充放电功率为正时, 储能处于充电状态.

#### (2) 储能充放电倍率约束

储能的充放电倍率为储能的充放电功率与电池容量的比值, 过大的充放电倍率可能会影响储能电池的寿命. 为了不影响电池的使用, 本文设定充放电倍率上限为  $0.4C$ , 储能充放电倍率约束表达式为

$$\frac{|P_{\text{b},t}|}{E} \leq k. \quad (8)$$

#### (3) 充放电深度约束

为了防止过度充电或者过度放电对储能电池寿命产生影响, 必须让储能电池运行在合适的荷电范围内.

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_t \leq \text{SOC}_{\max}. \quad (9)$$

#### (4) 荷电状态连续性约束

$$\text{SOC}_t = \begin{cases} \text{SOC}_{t-1} + \frac{\lambda P_{\text{b},t-1} \Delta t}{E}, & P_{\text{b},t-1} > 0, \\ \text{SOC}_{t-1} + \frac{P_{\text{b},t-1} \Delta t}{\lambda E}, & P_{\text{b},t-1} < 0. \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\lambda$  为储能系统的充放电效率.

## 4 算例分析

### 4.1 算例参数说明

本文以某商业区公共充电站为例, 对该充电站储能经济性配置展开研究, 采用粒子群算法进行计算. 商业区基本负荷及充电站内电动汽车负荷数据在图 2 中已给出. 商业区充电站能够提供 50 个车位, 每个车位都配备一个 30 kW 的充电桩, 单个充电桩的采购价格为  $1.05 \times 10^4$  元. 该商业区建筑楼顶有 6 400 m<sup>2</sup> 可用于布置光伏, 以最佳倾角和最小安装距离进行安装, 保证板间无阴影遮挡. 经过计算, 楼顶能够允许的最大光伏装机容量为 200 kW, 典型日光伏出力如图 4 所示. 参考屋顶光伏发电工程报价, 光伏发电系统建设成本为 8 000 元/kW, 光伏系统的设计寿命为 20 年, 运行维护系数为 20 元/kW<sup>[14]</sup>. 充电站储能系统选择的电池种类是磷酸铁锂电池, 单位容量电池的价格为 1 190 元/kWh, 功率转换装置单价为 1 550 元/kW, 年运行维护系数为 0.01, 设计使用寿命为 8 年, 其最大荷电状态  $\text{SOC}_{\max} = 0.9$ , 最小荷电状态  $\text{SOC}_{\min} = 0.1$ , 电池的充放电效率为 0.9<sup>[15]</sup>. 充电站固定成本主要包括变压器购买成本和充电站土地建设成本. 由于充电站典型日最大负荷接近 1 000 kW, 考虑到留有一定裕量, 变压器的选装容量为 1 250 kVA, 市面上该型号变



压器单价为 72 530 元,综合考虑该地区土建成本后,假设该充电站的固定成本总和为 300 万元. 考虑到资金的时间价值,模型中的每项成本和收益都折算为年值,投资期限内的年贴现率为 0.08<sup>[11]</sup>.

光储充电站作为电动汽车充电服务的提供者,其运营模式主要是按照峰谷电价从电网购电,再按照设定的价格收取用户的充电费,运营商从中间赚取差价盈利. 峰谷电价设定参考江苏省大工业用电电价,电动汽车充电费用参考南京市栖霞区某充电站充电电价,电价设定如表 1 所示. 此外,为响应电网削峰填谷的号召,为充电站设置一定的降峰补贴,本文假设降峰补贴为 0.2 元/kWh.

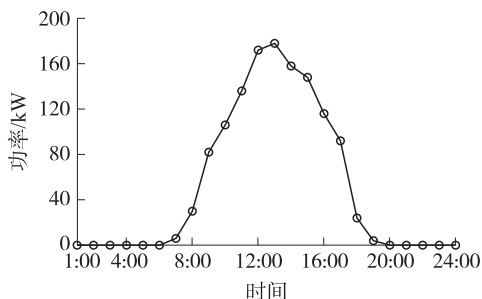


图 4 典型日光伏出力曲线

Fig. 4 Typical daily curve of photovoltaic

表 1 电价参数设置

Table 1 Parameter setting of energy price

	时段	购电价格/(元/kWh)	充电费/(元/kWh)
峰	09:00—13:00	1.069	1.5
	18:00—22:00		
平	13:00—18:00	0.641	1.5
	21:00—01:00		
谷	01:00—09:00	0.313	1.5

## 4.2 优化结果分析

### 4.2.1 储能容量配置

当储能容量配置不同时,储能的负荷优化能力也会有差异,这直接影响到充电站的收益. 仿真计算了充电站储能容量配置在 0~1 500 kWh 之间的收益分布情况,迭代间隔为 10 kWh,计算结果如图 5 所示. 由于粒子群算法在求解全局最优问题时不可避免会陷入局部最优,仿真计算出的充电站的收益分布呈现出波动性,对收益分布进行拟合,并以此作为充电站收益分布的参考值来估计充电站的最优容量配置.

充电站收益随着储能配置容量的增加总体上呈现出先增后减的趋势. 因为在初始阶段,储能能够充分发挥其削峰填谷的作用,储能容量增加为运营商带来的收益高于其配置成本,但是随着储能配置容量的继续增加,储能配置的成本越来越高,储能所能实现的收益无法覆盖其配置成本,使得充电站收益呈现下降趋势. 通过收益分布和拟合的结果可知,充电站储能容量在 580 kWh 附近处有最优经济配置.

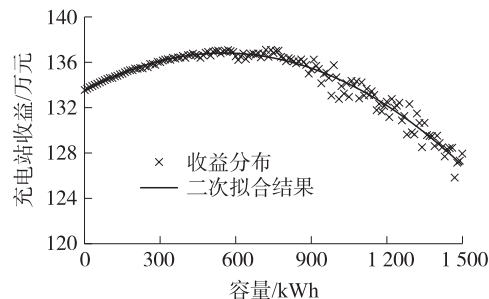


图 5 不同储能容量配置下充电站经济收益

Fig. 5 Economic benefits of charging station under different energy storage capacity

### 4.2.2 对比分析

为体现本文最终优化结果的有效性和优越性,本文引入传统配置方案进行对比. 方案 1 为传统配置方案,该方案是以峰谷差为主要优化目标的储能配置. 方案 2 为本文所提方案,是综合考虑了以充电站负荷以及经济性为优化目标的储能配置.

在同等储能容量配置(580 kWh)的前提下,两种方案的充电站站内负荷优化结果及储能充放电功率曲线如图 6、图 7 所示. 以 01:00—18:00 时段为例,可以看到 01:00—9:00 电价在低谷时段,两种方案下的储能系统都处于充电状态,站内负荷功率抬升. 09:00—13:00 电价在高峰时段,方案 2 下储能系统处于放电状态,而方案 1 由于没有达到全天负荷功率上限的参考值,储能处于闲置状态,仅通过光伏补充一部分用电需求. 13:00—18:00 电价处于平时段,此时段站内充电功率较为分散,且有光伏出力,方案 1 在该时段没有考虑为储能充电,导致该时段站内充电功率下陷. 而方案 2 在该时段处于充电状态,因此站内负荷功率没有出现明显的下陷,提高了电能的利用率. 方案 2 充分考虑了站内电动汽车负荷特性,制定了合理的运行策略. 按照该策略,储能系统一天可以做到两充两放,储能利用效率提升了一倍左右,有效利用了平谷时段多余的电量. 结合表 2 中的 3 项主要的优化指标可以看出,两种方案在前两项指标上较为接近,相比未优化前都有较大提升,在总削峰量上,方案 2 比方案 1 提升了 48.12%,因此方案 2 比方案 1 有更好的负荷优化效果.

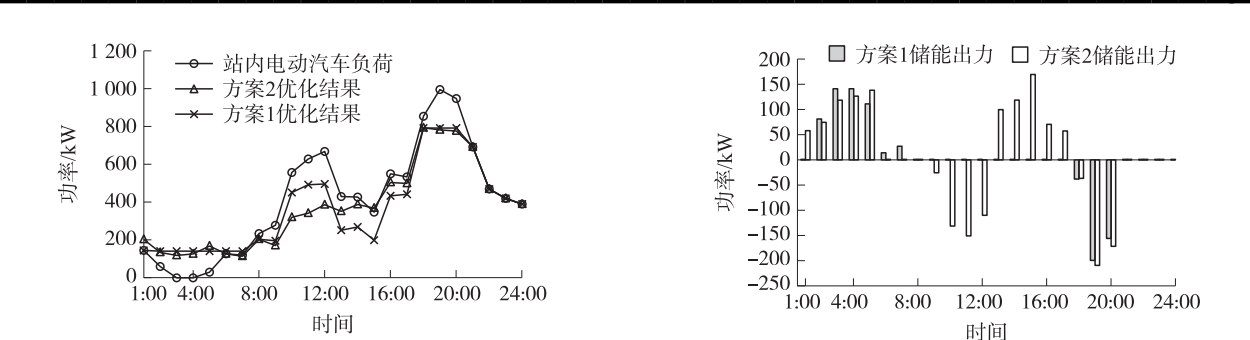


图 6 储能配置前后站内负荷对比

Fig. 6 Comparison of station load before and after energy storage configuration

由表 3 中给出的经济性指标可知,方案 2 由于合理利用峰谷电价来安排储能的充放电,储能的利用率要高于方案 1. 相应地,储能的削峰量也高于方案 1,所以方案 2 的年削峰激励比方案 1 高出了 22 962.6 元. 从年购电成本上看,方案 2 较方案 1 减少年购电成本 3.68 万元,是因为一天中峰值时段的负荷量占到全天总负荷量的 61.1%,方案 2 最大限度地利用平谷时段的低价电,可以减少对峰值时段高价电的依赖性,从而降低充电站的购电成本,进一步提升了充电站整体的经济效益.

表 2 充电站储能配置前后负荷优化指标			
Table 2 Load optimization index of charging station before and after energy storage configuration			
	未优化	方案 1	方案 2
充电站日负荷率/%	41.460	46.170	46.470
配电网负荷方差/ $10^4 \text{ kW}^2$	89.388	74.589	73.513
总削峰量/kWh	0	917.610	1 359.200

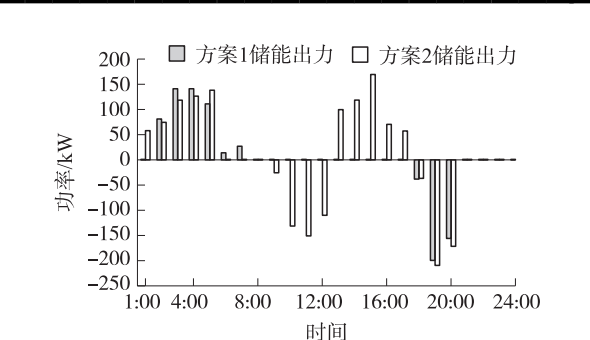


图 7 储能充放电功率优化曲线

Fig. 7 Energy storage charge/discharge optimization curve

表 3 充电站储能配置前后经济性指标			
Table 3 Economic index of charging station before and after energy storage configuration			
	未优化	方案 1	方案 2
年削峰激励/元	0	47 715.80	70 678.40
年购电成本/万元	221.53	188.39	184.71

5 结论

本文研究了商业区光储充电站储能经济性配置问题,考虑到充电站电动汽车负荷优化,制定了峰谷电价场景下的储能运行策略,建立了储能配置双层规划模型. 通过与传统以峰谷差为指标的配置方案对比,本文所提方案储能利用率提升了一倍左右,较好地改善了充电站的负荷分布情况,尤其是充电站总削峰量相比传统方案提升了 48.12%,与此同时充电站的年购电成本减少了 3.68 万元,说明本文配置模型的有效性. 因此,在具体工程应用中,为缓解充电站与电网之间的供需矛盾,可为充电站配置一定容量的储能作为缓冲. 另外,还应该根据充电站的负荷特点为储能设计合理的调度模型,通过对储能充放电的控制实现充电站整体经济性的提升.

[参考文献] (References)

[1] DHARMAKEERTHI C H,MITHULANANTHAN N,SAHA T K. Impact of electric vehicle fast charging on power system voltage stability[J]. International Journal of Electric Power and Energy Systems,2014,57:241-249.

[2] SINGH J,TIWARI R. Impact analysis of different charging models for optimal integration of plug-in electric vehicles in distribution system[J]. The Journal of Engineering,2019,18:4728-4733.

[3] 修晓青,李建林,惠东. 用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J]. 电力建设,2013,34(2):1-5.

[4] DENG J X,SHI J,LIU Y, et al. Application of a hybrid energy storage system in the fast charging station of electric vehicles[J]. IET Generation Transmission & Distribution,2016,10(4):1092-1097.

[5] 孙玉树,唐西胜,孙晓哲,等. 风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(增刊1):88-97.

[6] XU Y X,SINGH C. Power system reliability impact of energy storage integration with intelligent operation strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(2):1129-1137.

[7] DING H J,HU Z C,SONG Y H. Value of the energy storage system in an electric bus fast charging station[J]. Applied Energy,

- 2014, 157:630-639.
- [8] 李文超,童亦斌,张维戈. 计及电池使用寿命的电动汽车充电站储能容量配置方法[J]. 电工电能新技术,2019,39(4): 55-63.
- [9] 方超明,张宇,王育飞,等. 基于排队理论的储能式快充站容量优化配置[J]. 现代电力,2017,34(2):62-66.
- [10] 吕跃春,汪会财,李志勇,等. 电动汽车充储放电站储能系统容量配置方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(11): 133-137.
- [11] 何阳,张宇,王育飞,等. 考虑负荷优化的电动汽车光伏充电站储能容量配置[J]. 现代电力,2018,36(5):76-81.
- [12] 段雪. 考虑电动汽车规模化接入的配电网承载能力的研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.
- [13] 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.
- [14] 吴杰,温晨阳,李珊,等. 基于分时电价的光伏—储能系统容量优化配置[J]. 电工电能新技术,2018,37(1):23-30.
- [15] 谢桦,滕晓斐,张艳杰,等. 风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(6):70-82,115.

[责任编辑:陈 庆]