

# 一种电动汽车光伏充电站的分时段有序充电策略

邢欢<sup>1,✉</sup>, 许琴<sup>1</sup>, 任学哲<sup>1</sup>, 沈彦坤<sup>2</sup>, 刘昊一<sup>1</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 广州市易纬电子有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 针对电动汽车光伏充电站的有序充电问题, 提出一种分时段有序充电策略。[方法] 研究了光伏充电站的结构体系及工作原理, 构造了电动汽车充电时间、储能电池荷电状态(SOC)范围等约束条件。负荷高峰时段, 在满足车辆充电需求的同时, 减少向电网的购电量, 降低购电费用, 并辅助电网“消峰”。负荷低谷时段, 在满足车辆充电需求的同时, 增加向电网的购电量, 辅助电网“填谷”。[结果] 通过仿真事例验证了所建模型的有效性, 并与即时充电方案进行比较, 说明了所建模型在减小充电站的购电费用, 降低电网峰谷差方面的优势。[结论] 所提电动汽车光伏充电站的充电策略是正确并有效的, 可为实际应用提供参考。

**关键词:** 电动汽车; 光伏; 有序充电; 削峰填谷

中图分类号: TM721.1; TM73; U491.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)03-0112-07

开放科学(资源服务)二维码:



## A Time-phased Order Charging Strategy for an Electric Vehicle Photovoltaic Charging Station

XING Huan<sup>1,✉</sup>, XU Qin<sup>1</sup>, REN Xuezhe<sup>1</sup>, SHEN Yankun<sup>2</sup>, LIU Haoyi<sup>1</sup>

(1. China Energy Construction Group Guangdong Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Guangzhou Yiwei Electronics Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] Aiming at the problem of orderly charging of electric vehicle photovoltaic charging stations, the paper aims to establish a bucketed order charging strategy. [Method] The structure and working principle of the electric vehicle photovoltaic charging station were studied, and the charging conditions of the electric vehicle and the state of charge of the energy storage battery were constructed. During the peak load period, while meeting the vehicle charging demand, reduces the power grid purchases and the cost of electricity purchase, assisted the power grid to “eliminate the peak”. During the low load period, while meeting the vehicle charging demand, increased grid purchases and assists the power grid to “fill the valley”. [Result] The validity of the model is verified by simulation examples, compared with instant charging solutions, shows the advantages of the built model in reducing the cost of electricity purchase and reducing the peak-to-valley difference of the power grid. [Conclusion] The charging strategy of the proposed electric vehicle photovoltaic charging station is correct and effective, and can provide reference for practical applications.

**Key words:** electric vehicles; photovoltaic; orderly charging; peak load shifting

在过去的几十年中, 能源问题一直受到全世界的关注, 发展新能源汽车作为应对能源危机和环境保护的主要手段之一, 已经引起我国政府的高度重视。光伏充电站真正实现了零污染、零排放, 摆脱

了普通电动汽车对化石燃料的高度依赖<sup>[1-2]</sup>。有序充电问题一直是光伏充电站实际运行的关键问题, 良好的运行策略可帮助充电站节约能源、降低购电费用, 促进充电站参与电网的“削峰填谷”工作。

已有许多学者对常规充电站的有序充电进行研究, 文献 [3] 以电动汽车的充电开始时间为优化目标建立有序充电模型, 使优化模型得以简化, 但降低了调度的灵活性。文献 [4] 充分考虑充电站

收稿日期: 2019-04-16 修回日期: 2019-06-14

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项“工业园区多元用户互动的配用电系统关键技术研究及示范”(2016YFB0901300)

的经济效益,基于分时电价提出有序充电策略,可显著降低充电站的购电费用,但有在负荷低谷阶段产生新的负荷高峰的风险。文献[5]采用自适应变异的粒子群算法求解调度策略的多目标数学模型,弱化了标准粒子群容易早熟对优化结果的影响,但所建数学模型的各目标权重的确定还有待研究。

光伏充换电站的充电策略与常规充换电站的策略不同,需要单独讨论光伏充换电站的有序充电方法。针对光伏充换电站的研究主要集中在配电系统设计<sup>[6]</sup>、容量优化配置<sup>[7]</sup>、可靠性分析<sup>[8]</sup>等方面。在光伏充换电站的有序充电方面,文献[9]针对光伏换电站提出的有序充电方法保证了站内电池能够充分消纳光伏出力,但文中方法严重依赖预测数据,预测误差对运行结果影响很大,且没有考虑如何降低换电站的购电费用。文献[10]建立了电动汽车光伏充电站的多目标优化调度模型,但文中所提方案应用到实际工作中需要进行选择分析,在电网“削峰填谷”方面作用不明显。

本文在满足电动汽车充电需求和光伏充电站的储能电池负荷状态的基础上,根据分时电价和负荷曲线提出分时段有序充电方法。充分利用光伏发电和储能电池以降低负荷高峰时的用电量,并合理分配负荷低谷时段的购电功率,以达到降低充电站购电费用和缩小电网峰谷差的目的。

## 2 光伏充电站的结构体系及工作原理

### 2.1 光伏充电站的结构体系

如图1所示,光伏充电站的主要组成部分包括:光伏阵列、配套储能系统、直流母线、DC-DC变换器、AC-DC变换器、控制单元和充电桩。

### 2.2 光伏充电站的工作原理

光伏电池组、电网是充电桩的两种供电来源。光伏电池组吸收太阳能并发出直流电,经DC-DC单向变换器接入直流母线。10 kV电网经10 kV/380 V变压器和AC-DC单向变换器接入直流母线。储能单元主要由锂电池组成,起能量存储和调节作用,经DC-DC双向变换器接入直流母线。充电桩是电动汽车的充电终端,直流母线经由DC-DC单向变换器为充电桩供电。控制单元通过通讯线路(图1已略去)采集光伏、储能及分时电价的实时信息,

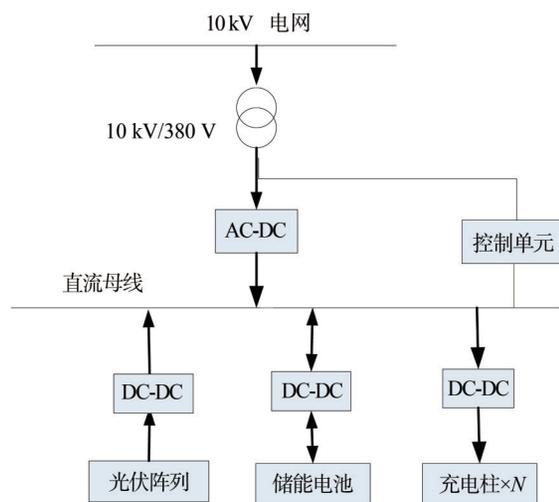


图1 光伏充电站的结构体系

Fig. 1 Structural system of photovoltaic charging station

根据有序充电策略控制各电气单元之间的能量流动。

## 3 有序充电约束条件

为了更好地进行有序充电,引入最晚充电时刻的概念。首先假设第 $n$ 辆来站充电的电动汽车的到站时间和离站时间分别为 $t_i$ ,  $t_k$ ,需求电量为 $Q_n$ 。需求电量随时间变化,定义 $t$ 时刻的剩余需求电量为 $Q_{nt}$ ,那么 $t$ 时刻以额定功率 $P$ 达到该车充电需求的充电时间为 $Q_{nt}/P$ 。即第 $n$ 辆来站车辆 $t$ 时刻的最晚充电时刻 $T_{wni}$ 为

$$T_{wni} = t_k - \frac{Q_{nt}}{P} - 1 \quad (1)$$

最晚充电时刻 $T_{wni}$ 代表以额定充电功率达到车辆充电电量要求和离站时间要求的最晚起始充电时刻。 $t_i \sim T_{wni}$ 为该车的可调度时间,即这个时间段可以选择性的对该电动汽车进行充电,若在此时间段内对电动汽车进行充电,则根据公式(1)更新最晚充电时刻 $T_{wni}$ , $-1$ 表示时间间隔。站内所有最晚充电时刻为 $t$ 的电动汽车数量定义为 $N_{wt}$ 。

### 3.1 充电功率约束

给电动汽车充电的功率需满足一定的约束条件,一方面,为保证电动汽车能够在离站时间前达到充电需求,根据最晚充电时刻的概念, $t$ 时刻分配给电动汽车的最小充电功率 $P_{\min t}$ 为:

$$P_{\min t} = N_{wt} \times P \quad (2)$$

另一方面,根据站内待充电的电动汽车的数量和充电桩的数量, $t$ 时刻分配给电动汽车的最大充

电功率  $P_{\max t}$  为:

$$P_{\max t} = \min [N_{\text{et}} \times P, N_z \times P] \quad (3)$$

式中:  $N_{\text{et}}$  为站内所有待充电的电动汽车数量 (单位);  $N_z$  为站内充电桩的数量 (单位)。

综上,  $t$  时段电动汽车的充电功率满足约束:

$$P_{\min t} \leq P_t \leq P_{\max t} \quad (4)$$

### 3.2 储能电池荷电范围和充放电功率约束

储能电池荷电范围主要受最大放电深度的约束。设储能电池的额定容量为  $U_{\text{soc}}$ , 储能电池最大放电深度为  $\lambda$ 。那么, 储能电池荷电范围约束为:

$$(1 - \lambda)U_{\text{soc}} \leq U_t \leq U_{\text{soc}} \quad (5)$$

定义  $U_t$  为  $t$  时段储能电池的容量,  $P_{\text{wr}}$  为  $t$  时段储能电池充放电功率 (正值代表充电, 负值代表放电), 那么:

$$U_{(t+1)} = U_{(t)} + P_{\text{wr}} \times \Delta t \quad (6)$$

式中:  $\Delta t$  为单位充电时间长度。考虑到双向 DC-DC 变换器的额定功率的限制, 储能电池的充放电功率  $P_{\text{wr}}$  需满足约束:

$$P_{\text{wr}} \leq |P_{\text{bn}} \eta_1| \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{bn}}$  为 DC-DC 变换器的额定功率;  $\eta_1$  为 DC-DC 变换器的转换效率。

### 3.3 配电网供电功率约束

配电变压器和 AC-DC 变换器的额定容量将限制配电网向系统供电的功率, 配电网供电功率满足约束,

$$P_{\text{gr}} \leq \min (P_{\text{T}}, P_{\text{AD}}) \quad (8)$$

式中:  $P_{\text{T}}$  和  $P_{\text{AD}}$  分别为配电变压器及 AC-DC 变换器的额定功率。

## 4 分时段有序充电的数学模型

对于分时段有序充电模型, 需要讨论对应不同的光伏条件, 分时电价及负荷分布的有序充电策略。设  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  和  $t_5$  分别为光伏发电的起始时刻、光伏发电的终止时刻、选取的负荷曲线低谷开始时刻、负荷曲线低谷结束时段及次日光伏发电起始时刻, 这样的  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  和  $t_5$  组成了周期为一天的不同时段。

### 4.1 $t_1$ - $t_2$ 时段的有序充电原则

$t_1$ - $t_2$  时段为光伏发电时段, 同时也是负荷曲线高峰时段。 $t_1$ - $t_2$  时段的有序充电原则为充分利用光伏发电, 辅助以储能电池和电网购电。通过比较  $t$

时刻的光伏发电量  $P_{\text{st}}$ , 最小充电功率  $P_{\min t}$  和最大充电功率  $P_{\max t}$  之间的关系, 充分利用光伏发电对站内车辆进行充电。

1) 若  $t$  时刻光伏发电功率可以满足站内车辆的最大充电功率需求, 即

$$P_{\text{st}} \eta_1 \eta_1 \geq P_{\max t} \quad (9)$$

则利用光伏发电功率按最大充电功率对站内车辆进行充电, 过程中优先对满足最晚充电时刻的车辆充电, 并用剩余的光伏功率给储能充电。此时, 储能电池的充电功率为

$$P_{\text{wr}} = P_{\text{st}} \eta_1 \eta_1 - P_{\text{er}} \quad (10)$$

2) 若  $t$  时刻的光伏发电功率可以满足站内车辆的最小充电功率但不足以满足站内车辆的最大充电功率, 即

$$P_{\max t} \geq P_{\text{st}} \eta_1 \eta_1 \geq P_{\min t} \quad (11)$$

则光伏发电在完成最小充电功率后, 将剩余光伏发电功率按到站顺序依次对其他在站车辆充电, 直至光伏电量用尽。

3) 若  $t$  时刻的光伏发电功率不能满足站内车辆的最小充电功率, 即

$$P_{\text{st}} \eta_1 \eta_1 \leq P_{\min t} \quad (12)$$

需要储能电池和电网补充, 考虑此时为负荷高峰时段, 以满足最小充电功率为基本原则, 尽量少的向配电网购电。具体有序充电策略分以下两种情况:

① 若光伏发电和储能电池可以满足最小充电功率, 则光伏和储能共同供电。此时, 储能电池的放电功率为

$$P_{\text{wr}} = \frac{P_{\min t}}{\eta_1 \eta_1} - P_{\text{st}} \quad (13)$$

② 若光伏发电和储能电池共同供电仍不能满足最小充电功率, 则由电网补充。此时, 储能电池的放电功率和配电网的购电功率分别为

$$P_{\text{wr}} = P_{\text{umax} t} \quad (14)$$

$$P_{\text{gr}} = \frac{P_{\min t}}{\eta_2 \eta_1} - \frac{P_{\text{st}} \eta_1}{\eta_2} - \frac{P_{\max t} \eta_1}{\eta_2} \quad (15)$$

式中:  $P_{\text{umax} t}$  为  $t$  时刻储能电池所能释放的最大功率;  $\eta_2$  为 AC-DC 变换器的转换效率。

### 4.2 $t_2$ - $t_3$ 时段的有序充电原则

$t_2$ - $t_3$  时段没有光伏发电, 仍有部分时段处在负荷高峰。为了尽可能避免增加电网负荷的负担,  $t_2$ - $t_3$  时段的充电原则与  $t_1$ - $t_2$  时段 (3) 的充电策略相近,

即优先利用储能电池进行充电以满足最小充电功率,储能电池不能满足要求时由配电网补充。

#### 4.3 $t_3-t_4$ 时段的充电原则

$t_3-t_4$ 时段为夜间负荷曲线低谷时段同时也为电价低谷时段。大量电动汽车在电价低谷时段无序充电容易对电网产生新的冲击,为避免上述情况发生,假定光伏充电站辅助电网缩小峰谷差会得到一定奖励, $t_3-t_4$ 时段的有序充电原则为:根据在站车辆的充电需求、储能电池荷电状态和基础负荷信息预估不同时刻的购电量,并根据实际的最大充电功率和最小充电功率微调购电量。在保证购电量和储能满足充电需求的同时,实现“填谷”的目的。根据预估购电量确定实际购电量的具体步骤如下:

1) 根据历史相似日预测当日上午配电网的基础负荷曲线,定义 $t_3-t_4$ 时段内基础负荷用电量为 $Q_{b(t_3-t_4)}$ :

$$Q_{b(t_3-t_4)} = \int_{t_3}^{t_4} P_{br} dt \quad (16)$$

式中: $P_{br}$ 为 $t$ 时段基础负荷的功率。

2) 在 $t_3$ 时刻,整合站内所有车辆的充电需求信息,计算待充车辆总的充电需求 $Q_{cv3}$ 。假设站内有 $k-j+1$ 辆待充电动汽车,车辆编号为 $j \dots k$ ,那么

$$Q_{cv3} = \sum_{n=j}^{n=k} Q_n \quad (17)$$

式中: $Q_n$ 为第 $n$ 辆到站车辆所需充电电量。

3) 在 $t_3$ 时刻,统计储能电池的电量信息,计算 $t_3$ 时刻储能电池的可放电容量:

$$Q_{ur3} = U_{i3} - (1 - \lambda)U_{soc} \quad (18)$$

4) 根据 $Q_b$ 、 $Q_{cv3}$ 和 $Q_u$ 求得“填谷”时段内新的负荷曲线各个时刻的平均值 $P_{av}$ ,

$$P_{av} = \frac{Q_{b(t_3-t_4)} + Q_{cv3} - Q_{ur3}}{t_4 - t_3} \quad (19)$$

5) 为使购电后负荷低谷时段的负荷曲线趋于平缓,各时段预估购电功率为

$$P'_{gr} = P_{av} - P_{br} \quad (20)$$

实际的购电功率需根据 $P'_{gr}$ 、 $P_{maxr}$ 、 $P_{minr}$ 、 $P_{umaxr}$ 的关系进行调整,调整原则为:

(1) 若预估购电功率大于最大充电功率,则实际购电量调整为 $P_{maxr}/\eta_1\eta_2$ 。

(2) 若预估购电功率不能满足最大充电功率但可以满足最小充电功率,则不调整。

(3) 若预估购电功率不能满足最小充电功率,不调整,储能电池的充放电功率因 $P_{umaxr}$ 的大小而定。

具体调整步骤如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} P'_{gr} \\ P_{ur} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} \frac{P_{maxr}}{\eta_1\eta_2} \\ 0 \end{bmatrix} & P'_{gr}\eta_1\eta_2 \geq P_{maxr} \\ \begin{bmatrix} P'_{gr} \\ 0 \end{bmatrix} & P_{minr} \leq P'_{gr}\eta_1\eta_2 < P_{maxr} \\ \begin{bmatrix} P'_{gr} \\ \frac{P_{minr} - (P_{av} - P_{br})\eta_1\eta_2}{\eta_1\eta_2} \end{bmatrix} & P'_{gr}\eta_1\eta_2 \leq P_{minr} \\ \begin{bmatrix} P'_{gr} \\ P_{umaxr} \end{bmatrix} & P_{umaxr}\eta_1\eta_2 \geq P_{minr} - P'_{gr}\eta_1\eta_2 \\ \begin{bmatrix} P'_{gr} \\ P_{umaxr} \end{bmatrix} & P_{umaxr}\eta_1\eta_2 < P_{minr} - P'_{gr}\eta_1\eta_2 \end{cases} \end{cases} \quad (21)$$

按上述策略, $t_3-t_4$ 时段内所得购电后的负荷曲线将在 $P_{av}$ 上下波动。

#### 4.4 $t_4-t_5$ 时段的充电原则

$t_4-t_5$ 时段为负荷低谷的上升阶段,充电原则与4.2充电策略相同。

## 5 算例分析

### 5.1 研究对象及相关基础数据

本算例中的电动汽车光伏充电站设有40台充电桩,单台充电桩的额定功率为10 kW。站内光伏系统的额定容量为200 kW。储能电池额定容量为1 MWh,最大放电深度为70%,双向DC-DC变换器的额定功率为200 kW、转换效率为97%。配电变压器的额定容量为1 MVA。AC-DC变换器的额定功率为560 kW,转换效率为97%。

光照强度不同,站内有序充电策略也将变化,选取两种典型光照数据如图2。由图2及基础负荷曲线,选取 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 和 $t_5$ 分别为8:00,18:00,1:00,6:00和次日8:00。

选取100辆私家车,使用的锂离子动力电池容量为32 kWh,利用蒙特卡洛方法预测车辆到达和离开车位的时间及动力电池的电量需求。设定控制终端每6分钟对在站车辆进行一次检测,为了表述方便,把一天划分成240个时段,假设1,2,3,

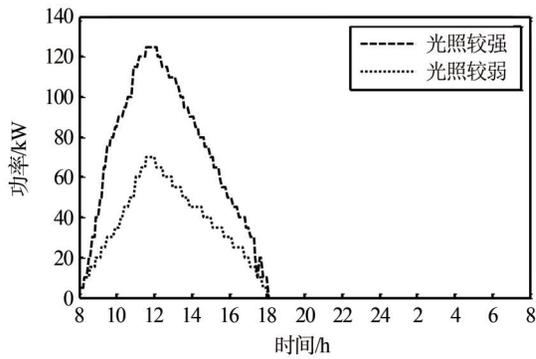


图2 光伏充电站光伏功率变化曲线

Fig. 2 Photovoltaic power curve of photovoltaic charging station

……240时段对应时间8:00, 8:06, 8:12, ……次日7:54, 生成的车辆充电数据如表1所示。

表1 车辆充电需求数据

Tab. 1 Vehicle charging demand data

到站时段	离站时段	电量需求/ kWh	到站时段	离站时段	电量需求/ kWh
1	68	13	95	227	16
2	69	13	95	234	16
4	80	15	96	226	13
5	77	13	96	230	12
6	82	10	99	231	11
7	57	10	101	227	11
8	78	15	101	233	11
8	69	16	102	235	12
9	60	15	102	236	15
9	81	10	103	237	17
10	70	13	104	224	16
11	79	9	104	232	13
12	77	8	105	237	13
13	68	14	110	234	16
14	84	17	111	223	11
15	70	13	112	238	13
18	92	9	114	237	14
21	224	14	116	235	11
25	92	15	117	217	15
35	78	15	117	237	17
40	86	13	118	238	10
43	87	14	119	223	19
47	88	12	120	145	15
50	89	14	121	227	10
51	221	14	122	235	15
58	222	11	123	220	13
59	90	12	123	237	10
64	236	15	123	225	15

表1(续) 车辆充电需求数据

Tab. 1(Cont.) Vehicle charging demand data

到站时段	离站时段	电量需求/ kWh	到站时段	离站时段	电量需求/ kWh
65	91	15	125	219	14
67	93	14	126	237	10
68	233	16	126	224	9
69	95	13	133	235	16
71	155	12	134	232	15
71	226	12	134	225	14
72	228	12	135	189	13
73	156	13	136	234	14
75	134	11	137	232	15
77	136	12	138	226	14
77	227	10	141	234	11
77	233	14	142	237	10
83	138	13	143	227	17
84	139	15	147	230	14
84	237	11	153	229	15
85	140	8	154	228	14
87	220	16	156	225	16
88	227	15	157	234	17
93	231	11	171	237	9
93	229	15	184	221	17
93	239	8	191	228	12
94	224	17	195	230	9

光伏充电站从电网购电采用分时电价<sup>[16]</sup>, 具体参数如表2所示:

表2 从电网购电分时电价

Tab. 2 Buying electricity from the grid

时段	购电电价/(元·kWh <sup>-1</sup> )
谷时段(00:00-08:00)	0.356
峰时段(08:00-12:00, 17:00-21:00)	0.869
平时段(12:00-17:00, 21:00-00:00)	0.687

## 5.2 优化结果分析

### 5.2.1 各组件功率变化分析

在不同的光照强度下, 按所建分时段有序充电模型分析各组件的功率变化, 研究模型的功率特性。图3和图4分别为光照较强和较弱时, 各部分的功率变化曲线。

由图3可以看出, 在光照较强的情况下, 负荷曲线高峰时段的电动汽车充电都来自光伏发电和储能电池, 大面积购电都发生在负荷曲线低谷时段。储能能在最后时段大量放电降低了当日购电费用。

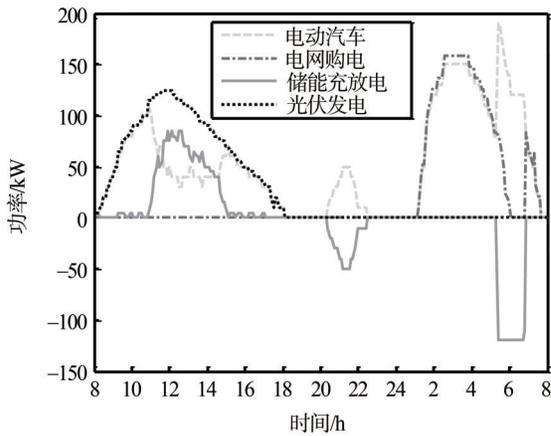


图3 光照较强时,各部分功率变化曲线

Fig. 3 Power curve of each part when the light is strong

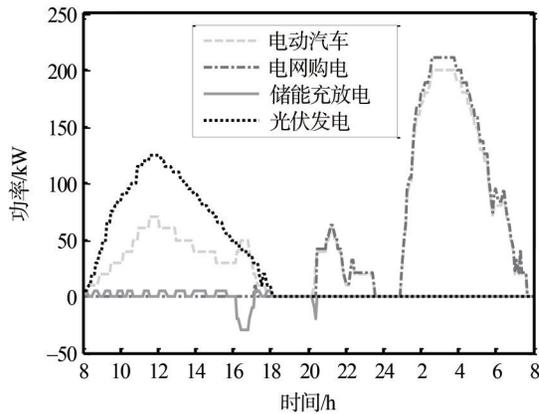


图4 光照较弱时,各部分功率变化曲线

Fig. 4 Power curve of each part when the light is weak

由图4可以看出,在光照较弱的情况下,负荷曲线高峰时段的电动汽车充电来自光伏发电、储能电池和电网购电,说明光伏发电向储能电池充电量不足以满足电价低谷时段之前的车辆充电需求,以至于在负荷曲线高峰时段发生少量购电的现象。

结合图3和图4可以看出,随着光照强度的减弱,会出现在负荷曲线高峰时段少量购电的情况,但大多数购电都发生在负荷低谷时段,说明所建分时段有序充电策略可以实现尽可能多的在负荷低谷时段购电,这样有助于降低充电站的购电费用、辅助电网“削峰填谷”。

### 5.2.2 与即时充电方式的比较分析

即时充电方案的基本充电策略是:电动汽车即停即充,直至充满;优先使用光伏发电对电动汽车进行充电服务,光伏发电的过剩功率向储能电池充电;光伏发电量不足时,由储能电池放电以满足电

动汽车充电需求;光伏发电和储能电池共同供电仍不能满足充电需求时,将由配电网补充。即时充电方案与本文的有序充电方案的主要区别是没有充分利用电动汽车充电的可调度时间。

在不同光照强度下,比较分析两种有序充电方式的运行效果。图5和图6分别为光照较强和较弱时,不同有序充电策略的负荷曲线。由图5和图6对比可知,即时充电大量在负荷曲线高峰时段购电,在增加充电站购电费用的同时,使得电网峰谷差增加11.7%左右,随着光照强度的减弱,即时充电所得新的负荷曲线的峰值将增大;分时段有序充电策略所得新的负荷曲线不但不会使负荷曲线峰值增大,而且提高了负荷曲线谷值,很好的达到了“削

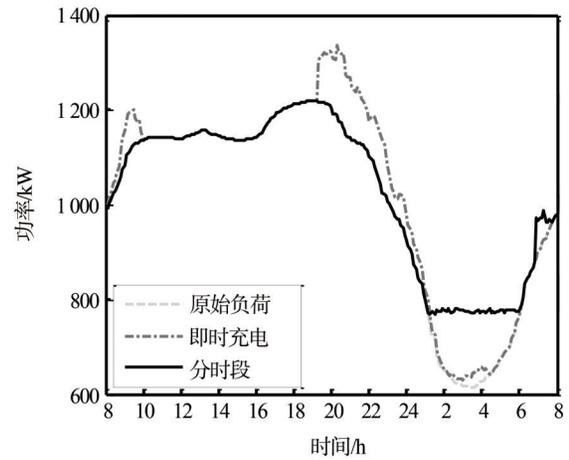


图5 光照较强时,不同充电策略的负荷曲线

Fig. 5 Load curve of different charging strategies when the illumination is strong

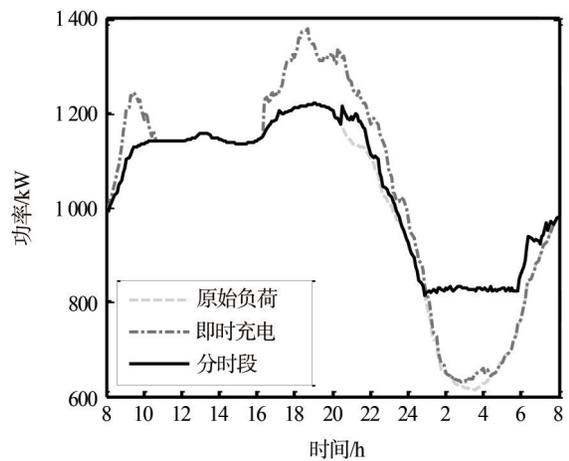


图6 光照较弱时,不同充电策略的负荷曲线

Fig. 6 Load curve of different charging strategies when the illumination is weak

峰填谷”的效果,使得电网峰谷差减小25.3%左右。

假设充电站运营商是光伏发电的投资主体,充电站充电的费用来源主要为采用分时电价向电网购电的费用。电网公司将依据光伏充电站负荷所引起配电变压器下峰谷差的变化给予该充电站的激励系数为0.2元/kW,下面通过具体数值进行对比分析见表3。

表3 不同有序充电策略下主要数据对比

Tab. 3 Comparison of main data under different ordered charging strategies

充电策略	光照较强			光照较弱		
	购电费 用/元	峰谷差/ kW	奖励/ 元	购电费 用/元	峰谷差/ kW	奖励/ 元
即时充电	446.22	707.05	0	743.27	748.66	0
分时段	207.07	453.04	30.6	381.28	407.29	39.8

## 6 结论

本文针对光伏充电站的有序充电问题建立了分时段有序充电策略,通过仿真结果分析,验证了方法的正确性。一方面,引入最晚充电时刻的概念,充分利用车辆充电的可调度时间,较即时充电策略减少了负荷高峰时段的购电量;另一方面,在负荷低谷时段,预估各时段购电量,避免出现新的负荷高峰。所建分时段有序充电方法较即时充电策略:

- 1) 减少了大量购电费用,且随着光照强度的减弱,购电费用增加。
- 2) 降低了负荷曲线的峰谷差,且随着光照强度的减弱,削峰填谷的效果减弱。
- 3) 多获得一些电网公司因负荷所引起配电变压器下峰谷差的变化给予的奖励。

### 参考文献:

- [1] 邢欢. 电动汽车光伏充电站的有序充电研究[D]. 保定:华北电力大学,2016.  
XING H. Research on ordered charging of electric vehicle photovoltaic charging station [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [2] 张场,马伟哲,程韧俐,等. 基于DIGSILENT的风光储微电网系统对电网安全稳定影响分析[J]. 南方能源建设,2018,5(增刊1):1-6.  
ZHANG Y, MA W Z, CHENG R L, et al. Analysis of the influence of wind power storage microgrid system based on DIGSILENT on power system security and stability [J]. South Energy Construction, 2018, 5(Supp. 1): 1-6.
- [3] 李秋硕,肖湘宁,郭静,等. 电动汽车有序充电方法研究[J]. 电网技术,2012,36(12):32-38.

- LI Q S, XIAO X N, GUO J, et al. Research on ordered charging method of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 32-38.
- [4] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):38-43.  
XU Z W, HU Z C, SONG Y H, et al. Ordered charging strategy of electric vehicles in charging stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.
- [5] 田文奇,和敬涵,姜久春,等. 基于自适应变异粒子群算法的电动汽车换电站充电调度多目标优化[J]. 电网技术,2012,36(11):25-29.  
TIAN W Q, HE J H, JIANG J C, et al. Multi-objective optimization of charging dispatching for electric vehicle battery swapping station based on adaptive mutation particle swarm optimization [J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 25-29.
- [6] 于蓉蓉. 光伏发电关键技术及电动汽车充电站可靠性研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.  
YU R R. Research on key technologies of photovoltaic power generation and reliability of electric vehicle charging station [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [7] 王海吉. 电网企业在电动汽车充电设施产业链的竞争分析[J]. 南方能源建设,2016,3(2):27-31.  
WANG H J. Competition analysis of power grid enterprises in the electric vehicle charging facilities industry China [J]. South Energy Construction, 2016, 3(2): 27-31.
- [8] 陈尚敏. 含光伏电源的电动汽车换电站运行与控制研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.  
CHEN S M. Research on operation and control of electric vehicle substation with photovoltaic power supply [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [9] 陈雷,卢斯煜. 电动汽车充电对住宅小区配电网的影响研究[J]. 南方能源建设,2018,5(1):51-58+97.  
CHEN L, LU S Y. Study on the influence of electric vehicle charging on distribution network of residential areas [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(1): 51-58+97.
- [10] 路欣怡,刘念,陈征,等. 电动汽车光伏充电站的多目标优化调度方法[J]. 电工技术学报,2014,29(8):46-56.  
LU X Y, LIU N, CHEN Z, et al. Multi-objective optimization scheduling method for electric vehicle photovoltaic charging station [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 46-56.

### 作者简介:



邢欢

邢欢(通信作者)

1989-, 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 广东省电力设计研究院有限公司工程师, 华北电力大学硕士, 主要研究电网安全稳定分析、电动汽车并网方向 (e-mail) 627728115@qq.com。

(责任编辑 李辉)