

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2021.05.001

考虑多充电模式的充电桩优化控制策略

南斌¹, 徐成司¹, 董树锋¹, 王海林², 焦昊³, 陈锦铭³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 出于对用户不同充电需求的考虑, 市场上出现了具有多种充电模式的充电桩, 增加了电动汽车充电控制的复杂性。针对区域内数量确定的充电桩, 文中研究了针对具有多种充电模式的充电桩的控制策略。首先, 根据充电桩和电动汽车的匹配结果, 建立了充电桩的负荷状态向量; 其次, 根据系统是否需要考虑调峰需求响应, 提出了不同的控制目标和控制策略; 最后, 以某实际工业园区为例, 计及园区光伏出力、电池储能及分时电价等条件, 进行仿真控制, 对比分析了其在不受控、不考虑需求响应控制以及考虑需求响应控制 3 种情况下的结果, 验证了文中控制策略的有效性。

关键词: 充电桩; 充电模式; 优化控制; 运行成本; 需求响应; 储能

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)05-0002-08

0 引言

电动汽车作为一种清洁、高效的交通工具, 在应对能源危机、缓解气候变化等领域具有重大优势, 因而得到各国广泛关注^[1-3]。但电动汽车大规模接入配电网会给电网运行造成一定影响^[4-9], 因此学者们针对电动汽车充电调度进行了大量研究。

目前国内外对电动汽车充电调度的相关研究主要集中于以下方面。一是对充电负荷的建模与时空预测^[10-12]。如文献[10]基于最小二乘法与灰色关系度理论预测电动汽车保有量, 建立电动汽车充电负荷时空分布的预测模型; 文献[12]将电动汽车按用途进行分类, 建立了多类型电动汽车充电负荷需求的概率模型。二是对以目标为导向的最优充电策略的研究^[13-17]。如文献[13]和文献[14]分别以充电站运营商购电成本最小和网损最小为目标进行优化控制; 文献[15]提出一种具体的两级式充电管理系统优化需求侧管理, 以减少电动汽车充电对电网的冲击; 文献[16]提出了一种用户利益最优、网损最小、充电站运营商利润最高等多目标的多方互利共赢的充电策略; 文献[17]提出一种含新能源接入的电动汽车有序充电分层控制策略。

如今关于电动汽车充电调度的研究主要围绕电动汽车进行, 对充电桩考虑较少, 往往将充电桩简单划分为“快充”和“慢充”, 采用单一的充电模式和固定的充电功率^[11, 18-19]。实际上很多充电桩产品不仅充电功率可以调控, 还允许用户根据自身需

要选择具体的充电模式, 如自动充满模式、按时间充电模式、按金额充电模式和按电量充电模式等。因此有必要在对电动汽车的调度研究中进一步考虑对充电桩进行控制。

文中以装有多充电模式充电桩的工业园区为场景对充电桩控制进行了研究。该工业园区采用源-储-荷结构, 包括光伏设备、储能设备、常规电负荷以及一定数量的充电桩。充电桩考虑了自动充满模式、按时间充电模式、按金额充电模式和按电量充电模式; 此外还考虑到调峰时段园区参与需求响应的因素。在上述场景下, 文中提出一种针对充电功率可以调控的多充电模式充电桩的控制策略, 挖掘了充电桩的可调控能力, 更符合实际。

1 具有多种充电模式的充电桩负荷模型

充电桩可分为直流充电桩和交流充电桩^[20]。直流充电桩的整流模块输出特性如图 1 所示^[21]。

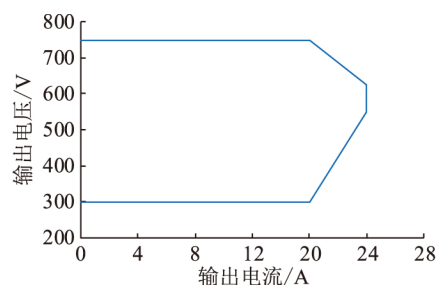


图 1 充电模块输出特性

Fig.1 Output characteristics of charging module

从图中可见该型号的整流模块有 2 个输出电压档位, 工作时直流充电桩为稳压源, 输出电压稳定。当输出电流超出其额定电流(图中为 20 A)时, 输出

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077193)

电压会发生改变。根据此特性,当充电桩处于充电状态时,可以通过调节电流的方式改变其输出功率,用充电桩的功率 P_{ref} 除以电压 U_d 可以得到充电桩的控制量输出电流:

$$I_{\text{ctrl}} = \frac{P_{\text{ref}}}{U_d} \quad (1)$$

对于交流充电桩,输出电压为 220 V 或 380 V 交流电,电压值保持稳定,因此已知功率量也可以实现对交流充电桩的控制。

主流的直流充电模块为 15 kW,因此直流充电桩额定功率主要有 30 kW、60 kW、120 kW 等,交流充电桩的额定功率一般只有 6.6 kW^[22]。

除了输出功率可控以外,现在市场上很多充电桩在设计上也考虑到用户不同的充电需求,设置了不同的充电模式供用户选择,包括自动充满、按时间充电、按金额充电和按电量充电等。文中建立的充电桩负荷模型涵盖了不同的充电模式。

在建立充电桩负荷模型前需先完成电动汽车和充电桩的匹配,匹配过程的基本思路是根据电动汽车的充电需求以及充电站内每个充电桩的可用时段信息,将电动汽车按顺序分配给不同的充电桩。具体步骤如下:

- (1) 获取待充电电动汽车的充电量要求和可充电时间要求等信息;
- (2) 确定站内所有的可用充电桩及其可用时段;
- (3) 明确匹配约束条件,如电动汽车充电量和充电时间限制、每个电动汽车最多只能用 1 个充电桩充电等;
- (4) 确定目标函数(如以最大化满足充电需求为目标),通过求解优化问题得到匹配方案。

完成该匹配过程后,就可以将充电桩作为负荷进行控制。借鉴文献[23]使用的通过向量表示驶电动汽车所处状态的负荷模型,对充电站内完成匹配的充电桩可以用式(2)所示的向量来表示其状态:

$$S_{c,i} = (P_{\text{cmax},i}, P_{\text{cmin},i}, R_{m,i}, T_{E,i}, M_i, R_i) \quad (2)$$

式中: $S_{c,i}$ 为第 i 个充电桩的状态向量; $P_{\text{cmax},i}$ 为第 i 个充电桩的最大充电功率; $P_{\text{cmin},i}$ 为第 i 个充电桩处于充电状态下的最小充电功率(即最小输出电流乘以输出电压); $R_{m,i}$ 为在自动充满模式下,第 i 个充电桩对应的电动汽车剩余需要的充电量; $T_{E,i}$ 为在按时间充电模式下,第 i 个充电桩设定的停止充电的时刻; M_i 为在按金额充电模式下,第 i 个充电桩设置的金额; R_i 为在按电量充电模式下,第 i 个充电桩对应

的剩余充电量。按照用户设定的充电模式, $R_{m,i}$, $T_{E,i}$, M_i , R_i 的其中一个为已知量。

例如,若 $S_{c,8} = (60 \text{ kW}, 12 \text{ kW}, -1, -1, -1, 33.8 \text{ kW}\cdot\text{h})$, 则表示第 8 个充电桩最大充电功率为 60 kW, 充电状态下最小充电功率为 12 kW, 选择按电量充电模式, 剩余充电量为 33.8 kW·h。

2 充电桩优化控制策略

充电桩控制的应用场景为日内控制或者实时控制,日内控制考虑的时间尺度为当前时刻到当日最后时刻,实时控制考虑的时间尺度为未来 4 h。

比如对充电桩以 15 min 为最小时间间隔进行控制,即充电桩在未来的每个 15 min 时间段内,可能处于停止或者充电的状态,假定充电状态下的充电功率可连续调节。控制方案可得到在每个 15 min 时间间隔内充电桩的启停状态,若为充电状态,可得到充电功率。为充电站内所有的充电桩建立状态向量,并组合为一个状态矩阵,该状态矩阵每隔 15 min 更新一次。

在对负荷进行建模后,为了建立合理的控制模型,需要明确充电桩负荷调度的控制目标。文中所提控制方案考虑了充电桩具有不同充电模式以及充电功率可调的因素,从工业园区实际运行的角度出发,分别在不考虑调峰需求响应和考虑调峰需求响应的情况下设置了相应的控制目标。

(1) 不考虑调峰需求响应时。在满足工业园区生产负荷需求以及园区关口功率限制的前提下,使整个园区的运行成本最小。

(2) 考虑调峰需求响应时。在最大化满足上级电网调峰需求的前提下,尽可能最小化工业园区的运行成本。

一般情况下园区进行用电调度时无需考虑调峰需求响应,满足自身负荷需求和功率约束条件即可,按照目标(1)对充电桩进行控制。当电网可靠性受到威胁时,像工业园区这类大用户会受到电力公司的引导以减少负荷,园区根据调峰需求进行响应,此时按照目标(2)进行控制,需额外考虑调峰时段的功率约束条件。

实际控制中根据园区的需求选择相应的控制模型,确定目标函数和约束条件,求解优化问题,进而为园区能量管理系统提供参考控制方案。

3 充电桩控制模型

每隔一定时间(如 15 min)对充电桩进行一次控制,通过求解优化问题得到控制方案。控制模型

分为 2 种情况,一种为考虑调峰需求响应,另一种为不考虑调峰需求响应。

3.1 不考虑调峰需求响应的充电桩控制模型

当不考虑调峰需求响应时,以工业园区运行成本最小为优化目标。此时目标函数为:

$$\min C_{\text{eqp}} = C_e - F_c \quad (3)$$

式中: C_{eqp} 为工业园区运行成本; C_e 为园区购电成本; F_c 为充电桩给园区带来的收益。常规电负荷为园区带来的收益成分复杂,但在控制过程中电负荷保持不变,该收益基本为常量,因此以运行成本最小为目标可以保证园区收益最大。

C_e 、 F_c 的具体表达式为:

$$\begin{cases} C_e = \sum_{t=1}^{N_T} (c_{e,t} P_t T) \\ F_c = \sum_{t=1}^{N_T} \left(c_{c,i,t} \sum_{i=1}^{N_c} (P_{c,i,t} T) \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: N_T 为优化控制的时段数,若为日内控制,则取 96,若为实时控制,则取 2; T 为每个时段长度; $c_{e,t}$ 为时段 t 的电价; P_t 为园区在时段 t 的购电功率; $c_{c,i,t}$ 为时段 t 的充电桩收费价格; N_c 为充电桩数量; $P_{c,i,t}$ 为第 i 个充电桩在时段 t 的充电功率。

约束条件如下:

(1) 工业园区电功率平衡约束。

$$P_t + P_{\text{pv},t} = P_{\text{L},t} + \sum_{i=1}^{N_c} P_{c,i,t} + \sum_k (P_{\text{bs},k,t} - P_{\text{bs},\rho,k,t}) \quad (5)$$

式中: $P_{\text{pv},t}$ 为光伏在时段 t 的出力; $P_{\text{bs},k,t}$ 、 $P_{\text{bs},\rho,k,t}$ 分别为第 k 个电池储能在时段 t 的充电功率和放电功率; $P_{\text{L},t}$ 为工业园区在时段 t 的负荷功率。

可以看出,园区电负荷可以消纳自身光伏出力,所以其购电功率可能小于负荷功率,削减园区购电成本;此外,通过调控储能设备的充放电时段可以调整购电功率的分布,当园区采用分时电价时,可以削减其购电成本。

(2) 工业园区的关口电功率约束。

$$P_t \leq P_{g,t} \quad t = 1, 2, \dots, N_T \quad (6)$$

式中: $P_{g,t}$ 为园区关口电功率上限。

(3) 充电桩的启停状态约束。对于第 i 个充电桩,用 0-1 变量表示充电桩的启停状态。 $x_{i,t}$ 为第 i 个充电桩在时段 t 的启停状态,若停止则 $x_{i,t} = 0$,否则 $x_{i,t} = 1$ 。

第 i 个充电桩的功率受启停状态约束如下(下式包括了最大功率约束):

$$\begin{aligned} x_{i,t} P_{\text{cmin},i} &\leq P_{c,i,t} \leq x_{i,t} P_{\text{cmax},i} \\ i = 1, 2, \dots, N_c, t = 1, 2, \dots, N_T \end{aligned} \quad (7)$$

(4) 充电桩的充电模式约束。对于处于自动充满模式的充电桩,充电量不超过使电动汽车充满的电量:

$$\sum_{t=1}^{N_T} (P_{c,i,t} T) \leq R_{m,i} \quad (8)$$

对于处于按时间充电模式的充电桩,在设定的时间过后,充电桩停止充电:

$$x_{i,t} = 0 \quad t \geq T_{E,i} \quad (9)$$

对于处于按金额充电模式的充电桩,充电桩消费金额不超过设定金额:

$$\sum_{t=1}^{N_T} (c_{c,i,t} P_{c,i,t} T) \leq M_i \quad (10)$$

对于处于按电量充电模式的充电桩,充电量不超过设定的电量:

$$\sum_{t=1}^{N_T} (P_{c,i,t} T) \leq R_i \quad (11)$$

由于目标函数中充电桩为电动汽车充电会为园区带来收益,因此优化结果会使上面的不等式约束尽可能达到边界值。

(5) 电池储能的电量与其充放电功率的关系约束。

$$S_{\text{bs},k,t+1} = (1 - \sigma_{\text{bs}}) S_{\text{bs},k,t} + \left(\eta_{\text{bs},c} P_{\text{bs},c,k,t} - \frac{P_{\text{bs},\rho,k,t}}{\eta_{\text{bs},\rho}} \right) T \quad (12)$$

式中: $S_{\text{bs},k,t}$ 为第 k 个电池储能在时段 t 结束时的电量; σ_{bs} 为电池储能的自损耗系数; $P_{\text{bs},c,k,t}$ 、 $P_{\text{bs},\rho,k,t}$ 分别为第 k 个电池储能在时段 t 上的充电功率和放电功率; $\eta_{\text{bs},c}$ 、 $\eta_{\text{bs},\rho}$ 分别为电池储能的充电效率和放电效率。

(6) 电池储能功率约束。

$$\begin{cases} P_{\text{bs},c,k,t} \leq P_{\text{bs},c,\text{max},k} \\ P_{\text{bs},\rho,k,t} \leq P_{\text{bs},\rho,\text{max},k} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{bs},c,\text{max},k}$ 、 $P_{\text{bs},\rho,\text{max},k}$ 分别为第 k 个电池储能的充电功率和最大放电功率。

(7) 电池储能电量约束。

$$S_{\text{bs},\text{min},k} \leq S_{\text{bs},k,t} \leq S_{\text{bs},\text{max},k} \quad (14)$$

式中: $S_{\text{bs},\text{max},k}$ 、 $S_{\text{bs},\text{min},k}$ 分别为第 k 个电池储能的电量和最小电量。

(8) 电池储能日累积电量为零约束(日内控制方式下)。

$$S_{\text{bs},k,N_T} = S_{\text{bs},k,0} \quad (15)$$

式中: $S_{\text{bs},k,0}$ 为第 k 个电池储能在当日 0 点的电量。

3.2 考虑调峰需求响应的充电桩控制模型

考虑调峰需求响应时,即当工业园区存在调峰需求时,控制目标为在最大化满足调峰需求的前提

下,尽可能最小化园区运行成本,此时目标函数为:

$$\min \left[\lambda_1 \sum_{t=\tau_0}^{\tau_1} (P_t - P_{\text{ref},t}) + \lambda_2 (C_e - F_c) \right] \quad (16)$$

式中: $P_{\text{ref},t}$ 为调峰时段 t 的调峰目标参考功率(调峰后的购电功率要尽可能接近该值); τ_0, τ_1 分别为调峰的起始时段和结束时段; λ_1, λ_2 为常数,且 $\lambda_1 \gg \lambda_2$ 。

此时仅改变原先的约束条件(2),其他约束条件和考虑需求响应时一致。考虑需求响应时的约束条件(2)如下。

(a) 调峰时段园区的调峰量不超过园区需求量:

$$P_t \geq P_{\text{ref},t} \quad t \in [\tau_0, \tau_1] \quad (17)$$

(b) 非调峰时段园区的关口功率约束:

$$P_t \leq P_{g,t} \quad t = 1, 2, \dots, N_T \text{ 且 } t \notin [\tau_0, \tau_1] \quad (18)$$

至此,文中建立了充电桩的优化控制模型。在电动汽车-充电桩匹配的基础上,该模型提出了2种充电桩控制方案,并创新性地考虑了具有多种充电模式的充电桩,建立了精确的充电桩模型,更加贴近用户对充电桩的使用需求。此外,在约束条件中综合考虑了工业园区的关口功率限制、园区电池储能以及新能源光伏出力等因素,符合现代化工业园区的实际情况,具有应用价值。

4 算例分析

4.1 算例概况

以广东某工业园区10月份单日的电负荷和光伏出力数据为例进行仿真分析。该园区当日的电负荷和光伏出力如图2所示。园区中的电池储能设备为可调设备,设备参数见表1。设优化控制的最小时间间隔为15 min,因此1 d的时段数为96。可进行控制的部分为园区购电功率、电池储能功率以及每个充电桩的充电时段和充电功率。

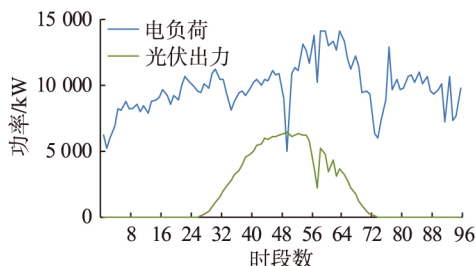


图2 园区日电负荷和光伏出力

Fig.2 Daily electric load and photovoltaic output in the park

该算例也考虑了分时电价的影响。分时电价是指根据用户需求,将全天时间划分为高峰、平段

表1 电池储能参数

Table 1 Parameters of energy storage battery

参数	数值	参数	数值
最大充电功率/kW	6 000	当日0点荷能状态	0.05
最大放电功率/kW	6 000	充电效率	0.95
最大荷能状态	0.95	放电效率	0.95
最小荷能状态	0.05	自损耗系数	0.002 5

和低谷3个时段,分别制定不同的电价水平以鼓励用户调整消费行为^[24]。算例使用的分时电价数据来自于广州市2019年4月起执行的分时电价:00:00—08:00为0.350 7元/(kW·h);08:00—14:00,17:00—19:00,22:00—24:00为0.701 4元/(kW·h);14:00—17:00,19:00—22:00为1.157 3元/(kW·h)。充电桩的收费价格为在分时电价的基础上增加0.8元/(kW·h)服务费。

设目前园区内有2个子充电站,各有10个充电桩,每个充电桩的最大充电功率和充电状态下最小功率不同,且选定了不同的充电模式。为便于描述,设2个子站的对应编号的充电桩设置相同,如表2所示,且后续做同一调度。

表2 充电桩设置

Table 2 Parameters of charging piles

充电桩编号	最大充电功率/kW	充电状态下最小功率/kW	充电模式	充电需求
1	120	24	自动充满	剩余需要的充电量 85 kW·h
2	60	12	按时间充电	停止充电的时刻为 09:00
3	90	18	按金额充电	设定金额为 85 元
4	30	6	按电量充电	剩余充电量 20 kW·h
5	21	0	自动充满	剩余需要的充电量 30 kW·h
6	7	0	按时间充电	停止充电的时刻为 13:00
7	14	0	按金额充电	设定金额为 40 元
8	60	12	按电量充电	剩余充电量 33.8 kW·h
9	90	18	按时间充电	停止充电的时刻为 08:30
10	120	24	按金额充电	设定金额为 75 元

为验证文中方法的有效性,算例设置了对照组。对照组中充电桩设置与表2中相同,区别仅在于开始充电时间集中设置在当日的上班时间,即电动汽车驶入充电站就开始充电,其充电负荷曲线见图3。此时,整个园区的日内运行费用为66 479.32

元,由充电桩充电所引起的购电成本为 745.66 元。假设从 07:00 开始对充电桩进行日内控制,此时电池储能的荷能状态为 0.835。

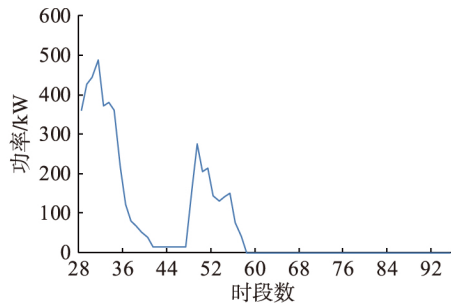


图 3 园区充电站的充电负荷
Fig.3 Charging load of the charging station in the park

4.2 算例结果

4.2.1 不考虑需求响应的日内控制

按照不考虑需求响应时的控制目标和约束条件,日内优化控制前后充电桩负荷曲线如图 4 所示,园区的储能功率和购电功率如图 5 所示,每个子站内充电桩的充电时间和充电功率分配见表 3。

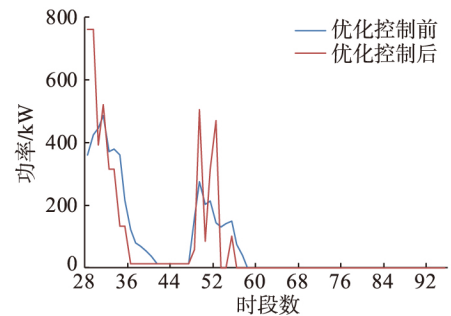


图 4 优化控制前后充电负荷对比
Fig.4 Comparison of charging load before and after optimized control

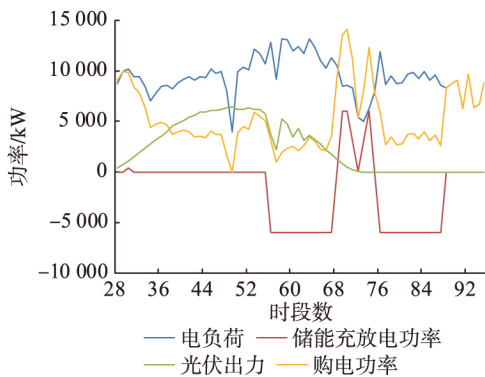


图 5 储能功率和购电功率
Fig.5 Energy storage power and purchasing power

从表 3 可以看出,使用该策略对充电桩进行控制,同样满足了电动汽车设定的充电需求。从图 4 可以定性看出优化后的充电时间部分转移到电价

表 3 不考虑需求响应的各充电桩功率
Table 3 Charging power without considering the demand response

充电桩编号	充电时段	功率/kW
1	12:15—12:30	120
	12:45—13:00	100
	13:00—13:15	120
2	07:00—09:00	60
	07:00—07:30	90
	07:30—07:45	25.47
3	07:45—08:00	90
	12:15—12:30	30
	13:00—13:15	20
4	13:45—14:00	30
	12:00—12:15	15
	12:15—13:15	21
5	13:45—14:00	21
	07:00—13:00	7
	07:00—08:00	14
6	12:00—12:15	7.65
	12:15—13:15	14
	12:15—12:30	60
7	12:45—13:00	15.2
	13:00—13:15	60
8	07:00—08:30	90
	07:00—07:30	120

较为便宜的时段(07:00—08:00 及 12:00—13:30),同时由于 12:00 时段光伏出力大于常规电负荷,所以将部分充电桩负荷移到该时段以消纳光伏出力。依据图 4 和图 5 中得到的各时段的充电功率和园区购电功率,可以定量计算出由充电桩充电所引起的购电成本为 669.34 元,整个园区的日内运行费用为 66 362.72 元,和对照组相比节约了 116.6 元,验证了文中方法的有效性。该算例中充电站规模较小,当充电站规模增大、利用率提高时实施该控制的效果会更加明显。

4.2.2 考虑需求响应的日内控制

设 12:30—13:30 园区存在调峰需求,需将关口功率控制在 4 000 kW。图 6 展示了园区考虑需求响应前后的关口功率变化。图 7 展示了考虑需求响应前后储能设备充、放电功率的变化。各充电桩的充电时间和充电功率分配见表 4。

图 6 表明,通过该策略的控制达到了既定的调峰要求。对比表 3 和表 4 可以看到,在考虑需求响应的条件下对园区进行相应控制时,该策略首先调用了充电桩进行调峰,除了要满足第 5 个充电桩设定的充电时间要求外,其余充电桩充电时段均避开

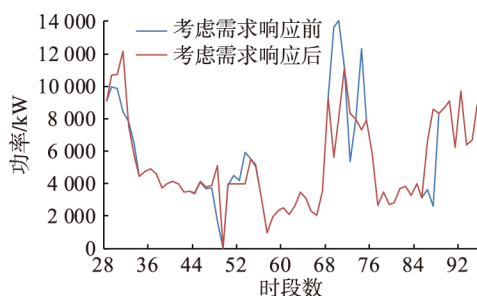


图6 需求响应前后关口功率变化

Fig.6 Comparison of the electric power before and after demand response

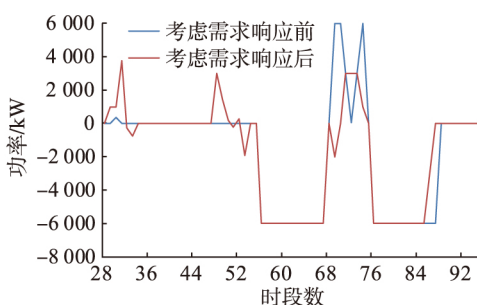


图7 需求响应前后储能功率变化

Fig.7 Comparison of the energy storage power before and after demand response

表4 考虑需求响应后各充电桩功率

Table 4 Charging power considering the demand response

充电桩编号	充电时段	功率/kW
1	12:00—12:15	100
	12:15—12:30	120
	13:45—14:00	120
2	07:00—09:00	60
	07:00—07:30	90
3	07:30—07:45	25.47
	07:45—08:00	90
4	11:45—12:00	20
	12:00—12:30	30
5	11:00—11:15	15
	11:15—12:30	21
6	07:00—13:00	7
	07:00—08:00	14
7	11:15—11:30	7.65
	11:30—12:30	14
8	11:45—12:00	15.2
	12:00—12:30	60
9	07:00—08:30	90
10	07:30—08:00	120

了调峰时段。由于只调用充电桩无法满足调峰需求,根据图7可以看出该策略还调用了储能设备参与调峰,储能设备在调峰时段有额外放电。计算可

得此时园区的日内运行费用为66 666.25元,由于调峰容量引起的成本差异导致该费用比不考虑需求响应时的费用高。

5 结语

针对电动汽车充电调度问题,文中从充电桩的角度出发,提出了适用于工业园区的充电桩控制策略。该方案在电动汽车-充电桩匹配的基础上,建立了充电桩负荷状态模型;根据园区是否参与调峰需求响应,提出了2种可选择控制方案,并给出相应的约束条件,建立了充电桩控制模型。在考虑调峰需求的情况下,充分挖掘充电桩的可调控能力,提升了园区的需求响应容量。该策略首次考虑了充电桩的多种充电模式,包括自动充满模式、按时间充电模式、按金额充电模式和按电量充电模式,更加贴近实际。此外该策略综合考虑了园区的用电成本、充电桩收益以及充电桩的充电模式约束,得到使园区经济最优的充电桩控制方案。

文中以电动汽车和充电桩完成匹配为基础对充电桩进行控制,该匹配过程对电动汽车的考虑还较为简单,没有详细考虑电动汽车的实时动态调度问题。后续研究将综合考虑对电动汽车进行实时控制,加入引导策略,完成电动汽车和充电桩的动态匹配,提升系统可调控能力。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2020052)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 庄幸,姜克隽.我国纯电动汽车发展路线图的研究[J].汽车工程,2012,34(2):91-97.
ZHUANG Xing,JIANG Kejun. A study on the roadmap of electric vehicle development in China[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(2): 91-97.
- [2] 蒋燕萍,陈佩军,陈海燕.电动汽车集约型换电设施的设计研究[J].发电技术,2019,40(6):535-539.
JIANG Yanping,CHEN Peijun,CHEN Haiyan. Research and design on intensive power exchange facility of electric vehicles[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(6): 535-539.
- [3] 李兴源,蒋林洳,陈中,等.考虑电动汽车互动的综合能源系统扩展规划[J].电网与清洁能源,2020,36(4):106-114.
LI Xingyuan,JIANG Linru,CHEN Zhong et al. Expansion planning of integrated energy system with the interaction between electric vehicles and power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 106-114.
- [4] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J].中国电机工程学报,2012,32(4):1-10,25.
HU Zechun,SONG Yonghua,XU Zhiwei et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.

- [5] 范晋衡,刘琦颖,曲大鹏,等.考虑电动汽车充电负荷的配电网运行风险控制与优化[J].电网与清洁能源,2020,36(9):105-112,121.
FAN Jinheng,LIU Qiying,QU Dapeng,et al. Control and optimization of operation risk of distribution network considering electric vehicle charging load[J]. Power System and Clean Energy,2020,36(9):105-112,121.
- [6] 李磊,赵新,李晓辉,等.基于动态交通信息的电动汽车充电需求预测模型及其对配网的影响分析[J].电网与清洁能源,2020,36(3):107-118.
LI Lei,ZHAO Xin,LI Xiaohui,et al. Electric vehicle charging demand prediction model based on dynamic traffic information and its impacts on distribution networks[J]. Power System and Clean Energy,2020,36(3):107-118.
- [7] 陈宇,彭潇,丁婧,等.电动汽车参与风电场输出功率波动平抑方法研究[J].发电技术,2019,40(1):91-98.
CHEN Yu,PENG Xiao,DING Jing,et al. Research on the method of stabilizing the power output fluctuation of wind farm by electric vehicles[J]. Power Generation Technology,2019,40(1):91-98.
- [8] GREEN R C,WANG L F,ALAM M. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2011,15(1):544-553.
- [9] CLEMENT-NYNS K,HAESSEN E,DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):371-380.
- [10] 李丹奇,郑建勇,史明明,等.电动汽车充电负荷时空分布预测[J].电力工程技术,2019,38(1):75-83.
LI Danqi,ZHENG Jianyong,SHI Mingming,et al. Prediction of time and space distribution of electric vehicle charging load[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(1):75-83.
- [11] 陈丽丹,张尧,Antonio FIGUEIREDO.电动汽车充放电负荷预测研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(10):177-191.
CHEN Lidan,ZHANG Yao,FIGUEIREDO A. Overview of charging and discharging load forecasting for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(10):177-191.
- [12] 周念成,熊希聪,王强钢.多种类型电动汽车接入配电网的充电负荷概率模拟[J].电力自动化设备,2014,34(2):1-7.
ZHOU Niancheng,XIONG Xicong,WANG Qianggang. Simulation of charging load probability for connection of different electric vehicles to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):1-7.
- [13] 常方宇,黄梅,张维戈.分时充电价格下电动汽车有序充电引导策略[J].电网技术,2016,40(9):2609-2615.
CHANG Fangyu,HUANG Mei,ZHANG Weige. Research on coordinated charging of electric vehicles based on TOU charging price[J]. Power System Technology,2016,40(9):2609-2615.
- [14] DEILAMI S,MASOUM A S,MOSES P S,et al. Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2011,2(3):456-467.
- [15] 张军,韩华春,原增泉.基于两级充电管理系统的电动汽车智能充电控制系统研究[J].电力工程技术,2017,36(5):86-92.
ZHANG Jun,HAN Huachun,YUAN Zengquan. Smart charging control electrical vehicles based on two-level charge management system[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(5):86-92.
- [16] 侯慧,樊浩,苏舒,等.多方互利共赢的电动汽车智能充电服务策略[J].电力系统自动化,2017,41(19):66-73.
HOU Hui,FAN Hao,SU Shu,et al. Multilateral win-win strategy for smart charging service of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(19):66-73.
- [17] 占恺峤,胡泽春,宋永华,等.含新能源接入的电动汽车有序充电分层控制策略[J].电网技术,2016,40(12):3689-3695.
ZHAN Kaiqiao,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Electric vehicle coordinated charging hierarchical control strategy considering renewable energy generation integration[J]. Power System Technology,2016,40(12):3689-3695.
- [18] 贾龙,胡泽春,宋永华.考虑不同类型充电需求的城市内电动汽车充电设施综合规划[J].电网技术,2016,40(9):2579-2587.
JIA Long,HU Zechun,SONG Yonghua. An integrated planning of electric vehicle charging facilities for urban area considering different types of charging demands[J]. Power System Technology,2016,40(9):2579-2587.
- [19] 王毅,麻秀,万毅,等.基于分时充放电裕度的电动汽车有序充电引导策略[J].电网技术,2019,43(12):4353-4361.
WANG Yi,MA Xiu,WAN Yi,et al. Sequential charge-discharge guidance strategy for electric vehicles based on time-sharing charging-discharging margin[J]. Power System Technology,2019,43(12):4353-4361.
- [20] 张祖平,陈麒宇,杨秀媛,等.大容量直流充电桩集群的调峰研究[J].发电技术,2019,40(1):11-16.
ZHANG Zuping,CHEN Qiyu,YANG Xiuyuan,et al. Study of the group controlling on large-capacity DC charging piles for peak load regulation[J]. Power Generation Technology,2019,40(1):11-16.
- [21] R75020G1 充电模块用户手册[Z].深圳:华为技术有限公司,2018.
User's manual of R75020G1 charging module[Z]. Shenzhen: HUAWEI Technologies Co., Ltd. 2018.
- [22] 本刊编辑部.有关电动汽车充电桩的标准及要求[J].电气工程应用,2018(3):10-14.
Editorial department. Standards and requirements for charging piles for electric vehicles[J]. Application of Electrical Engi-

neering 2018(3) : 10-14.

2005 22(2) : 82-85.

- [23] 葛少云, 连恒辉, 刘洪, 等. 电动汽车时序响应能力模型与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3) : 33-38, 151.
GE Shaoyun, LIAN Henghui, LIU Hong et al. Timing response capability model and control method of electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3) : 33-38, 151.
- [24] 赵娟, 谭忠富, 李强. 我国峰谷分时电价的状况分析[J]. 现代电力, 2005, 22(2) : 82-85.
ZHAO Juan, TAN Zhongfu, LI Qiang. Analysis of time-of-use (TOU) power price in China [J]. Modern Electric Power,

作者简介:



南斌

南斌(1998) 男, 硕士在读, 研究方向为综合能源系统的优化调度(E-mail: 3160105500@zju.edu.cn);

徐成司(1995) 男, 硕士在读, 研究方向为配电系统规划与运行;

董树锋(1982) 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统状态估计、电力系统与综合能源系统优化运行等。

Optimized control strategy of charging piles considering multiple charging modes

NAN Bin¹, XU Chengsi¹, DONG Shufeng¹, WANG Hailin², JIAO Hao³, CHEN Jinming³

(1. College of Electrical Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In consideration of the different charging needs of users, the charging pile with multiple charging modes appears, increasing the complexity of electric vehicle charging control. Aiming at a certain number of charging piles with multiple charging modes, an optimized control strategy of charging piles is proposed. Firstly, according to the matching results of the charging piles and electric vehicles, the load state vector of the charging pile is established. Secondly, according to whether the control system needs to consider the demand response of the peak shaving, different control objectives and strategies are proposed. Finally, an actual industrial park is taken as an example. Considering the PV output, battery storage and time-of-use electricity price in the park, the results under the three conditions of uncontrolled, control without considering demand response, control considering demand response are compared and the effectiveness of the proposed strategy is verified by simulation.

Keywords: charging pile; charging modes; optimization control; operational cost; demand response; energy storage

(编辑 方晶)