

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201296

考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略

李景丽¹, 时永凯¹, 张琳娟², 杨旭晨¹, 王利利², 陈星³

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450000;
3. 国网河南省电力公司商丘供电公司, 河南 商丘 476000)

摘要: 针对电动汽车和光伏系统接入配电网与储能装置结合过程中的配置优化问题, 提出了一种考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略。首先, 基于典型日光照强度曲线和光电能量转换关系计算光伏系统输出功率。其次, 根据电动汽车用户出行习惯、充电行为特性、充电模式等充电负荷影响因素, 建立影响电动汽车充电负荷的概率模型, 利用蒙特卡洛方法预测无序充电下电动汽车充电负荷。然后, 以电网出力曲线峰谷差最小为目标函数、采用粒子群算法计算电动汽车有序充电时电网出力总负荷, 进而确定光储充电站储能容量最优解。最后, 利用所提策略计算以电动私家车和电动出租车为主要服务对象的某居民区光储充电站内最优储能容量。结果表明, 未考虑储能时电动汽车无序充电造成电网负荷峰上加峰, 有序充电下电网负荷峰谷差值下降 15.35%, 考虑电动汽车有序充电同时配置最优储能容量时电网负荷峰谷差值下降了 20.65%, 实现了削峰填谷, 增强了电力系统运行的稳定性。得到的结果为光储充电站的储能容量配置提供了参考。

关键词: 电动汽车; 有序充电; 光储充电站; 容量优化; 粒子群算法

Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles

LI Jingli¹, SHI Yongkai¹, ZHANG Linjuan², YANG Xuchen¹, WANG Lili², CHEN Xing³

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. State Grid Henan Economic and Technological Research Institute, Zhengzhou 450000, China;

3. Shangqiu Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Shangqiu 476000, China)

Abstract: There is a configuration optimization problem in the process of integrating electric vehicles and photovoltaic systems into the distribution network and energy storage devices. Thus this paper proposes an energy storage capacity optimization strategy for photovoltaic storage charging stations that considers the orderly charging of electric vehicles. First, it calculates the output power of the photovoltaic system based on a typical daylight intensity curve and the photoelectric energy conversion relationship. Secondly, from charging load influencing factors such as the travel habits of electric vehicle users, charging behavior characteristics, charging mode and so on, a probability model that affects the charging load of electric vehicles is established, and the Monte Carlo method is used to predict the charging load under disorderly charging. Then taking the minimum peak-valley difference of the power grid output curve as the objective function, the particle swarm algorithm is used to calculate the total power grid output load during orderly charging, and it then determines the optimal solution for the energy storage capacity of an optical storage charging station. Finally, the strategy is used to calculate the optimal energy storage capacity in a residential area optical storage charging station with electric private cars and electric taxis as the main service objects. The results show that the disorderly charging of electric vehicles when energy storage is not considered causes the power grid load to add peaks. The peak-to-valley difference of the power grid load is reduced by 15.35% under orderly charging. When the orderly charging of electric vehicles is considered and the optimal energy storage capacity is configured, the peak-to-valley difference of power grid load decreases by 20.65%. This realizes peak shaving and valley filling, and enhances the stability of power system operation. The results obtained in this paper provide a reference for the energy storage capacity configuration of an optical storage charging station.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51307152).

Key words: electric vehicle; orderly charging; optical storage and charging station; capacity optimization; particle swarm algorithm

0 引言

随着环境污染、资源短缺等问题的加剧, 电动汽车因其无污染、低噪声等优点而受到推崇, 据工业和信息化部《电动汽车发展战略研究报告》预测, 2030 年我国电动汽车保有量将达到 6000 万辆。为满足电动汽车高速增长的充电需求, 政府有关部门提出加大公共充电基础设施投资, 进一步建设分散式充电桩和公共充电站^[1]。

常规电动汽车充电站主要通过区域配电网单独进行供电, 目前电网电能最大来源仍然是传统火力发电, 电动汽车充电期间产生大量间接碳排放^[2], 与传统燃油车相比环保优势并不明显, 在电源侧利用新能源发电是一个有效减少碳排放的途径^[3-7]。文献[8]提出一种针对含分布式电源与充电站的配电网进行综合协调规划的方法; 文献[9]建立了光伏发电全额利用和允许弃光两种情况下的能量优化模型, 采用遗传算法求解得到新能源充电站单日最大利润; 文献[10]提出一种基于电动汽车充放电功率和网络重构的主动配电网两阶段协调优化调度策略, 在满足用户需求的基础上提高新能源消纳能力。上述文献均没有考虑在充电站中配置储能电池组, 光储充电站通过将光伏发电系统和电池储能系统接入充电站母线, 实现资源合理利用和经济效益提升。光储充电站中光伏出力因气象等因素而产生的不确定性可能会导致光伏功率的间歇性剩余和电网功率的波动, 为了充分利用光伏电能, 不间断地为负荷提供功率, 研究储能容量优化配置方案具有重要意义^[11-15]。文献[16]提出分时电价下储能充放电策略及微网优化运行策略, 采用改进遗传算法求解储能系统最优容量配置, 缺乏对电网运行影响的分析; 文献[17]通过分析光伏日发电预测曲线和配电网分时电价特性建立了经济调度模型, 基于粒子群算法计算综合费用, 进而确定光伏和储能的最优容量, 但缺乏对具体负荷特性的分析。文献[18]简单探讨了电动汽车无序充电、有序充电两种情况下充电站储能容量配置的优化问题, 对本文研究有一定的借鉴意义。

随着电动汽车、光伏系统和储能装置结合应用场景的增加, 考虑电动汽车充电控制策略^[19-25]和储能电池的容量优化尤为重要。文中提出一种考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略。首先基于典型日光照强度曲线和光电能量转换关系计算光伏系统输出功率; 其次根据电动汽车用户出行习惯、充电行为特性、充电模式等充电负荷影响因素, 建立影响电动汽车充电负荷的概率模型, 利

用蒙特卡洛方法预测无序充电下电动汽车充电负荷; 然后以总体电网出力曲线峰谷差最小为目标函数、采用粒子群算法计算考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量最优解; 最后利用文中所提策略计算以电动私家车为主要服务对象的某居民区光储充电站内最优储能容量。

1 光储并网系统

按照运行方式不同, 光储充电站系统分为独立式和并网式两种。独立式光储充电站根据当地资源条件选择光伏及其他合适能源独立发供电, 不与电网连接, 多应用于发电资源丰富的地区; 并网式光储充电站是指充电站直接与当地配电网连接, 由光伏发电系统和电网共同进行供电, 可以实现与电网之间的功率交换。并网式光储充电站系统架构如图 1 所示, 主要包含光伏发电系统、蓄电池储能系统、电动汽车负荷和站内监控系统四部分。充电站采用直流母线供电方式, 光伏系统和充电装置通过单向 DC/DC 变换器与充电站母线连接, 分别向母线供电和接受母线供电, 采用双向 DC/DC 变换器将储能电池组接入^[26]。光伏阵列发出直流电经 DC/DC 变换器优先给电动汽车充电, 多余电能补充蓄电池组电能或供给电网, 如果光伏发电功率小于电动汽车充电负荷功率, 负荷超出部分由储能蓄电池组或电网向负荷供电, 最大限度利用光伏发电。

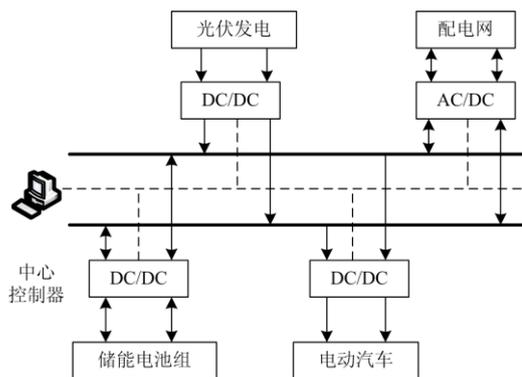


图 1 光储充电站系统架构图

Fig. 1 Architecture diagram of optical storage and charging station system

2 光储充电站相关特性分析

光储充电站通过储能装置和配电网结合实现尽可能消纳光伏发电、不间断为电动汽车充电负荷供电, 计算光伏出力和电动汽车充电负荷是合理配置储能容量的基础。

2.1 光伏出力特性

光伏电池组件主要由硅材料构成, 硅材料中的

电子和空穴在太阳光照射下会进行定向移动,进而在电池内产生电场,外部存在负载接入时形成通路,输出电功率。光伏发电系统功率输出受系统内部因素和外部因素影响,目前通过定期维护、更换等方式减小光伏设备老化等内部因素的影响,文章主要考虑外部气象因素中日光照强度对系统功率输出的影响,对某地区光伏充电站光照强度变化规律进行分析,通过简化的光电能量转换关系建立光伏出力时间周期模型。

光伏出力主要与太阳辐照强度有关,某地区典型日的光照强度曲线如图2所示^[27]。

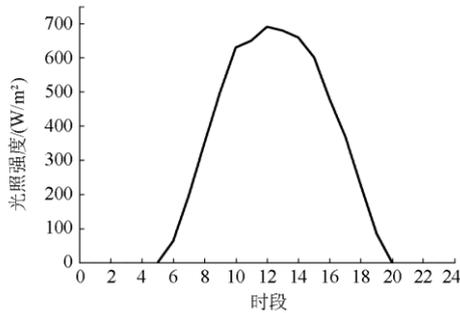


图2 典型日光照强度

Fig. 2 Typical daily illumination intensity

根据光电能量转换关系,光伏系统输出功率计算公式为

$$P_{pv,t} = \frac{\eta S r_t}{1000} \quad (1)$$

式中: $P_{pv,t}$ 为 t 时刻光伏系统输出功率,单位为 kW; η 为光伏发电系统的总效率; S 为光伏阵列的总面积,单位为 m^2 ; r_t 为 t 时刻光照强度,单位为 W/m^2 。

根据充电站相关数据,取光伏发电系统总效率为 20%,光伏阵列铺设面积为 $2\,000\,m^2$,由式(1)计算得某一典型日的光伏出力如图3所示。

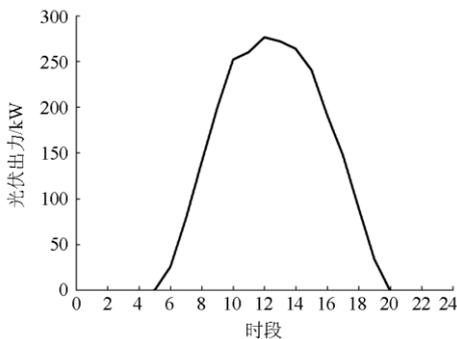


图3 典型日光伏出力

Fig. 3 Typical daily photovoltaic output

2.2 电动汽车充电负荷特性

2.2.1 电动汽车充电负荷影响因素

文章以供应电动私家车和出租车充电的居民区光储充电站为研究对象,居民区光储充电站充电负荷主要受充电站覆盖区域内的电动汽车数量、充电方式、用户行驶特性、充电行为特性等因素影响。

1) 充电方式

目前,电动汽车充电主要采用快速充电和常规充电两种充电方式。快速充电模式下充电桩充电功率大,电动汽车满足自身电能供给耗时短,但所需充电设施造价高,同时给电网带来一定程度的冲击,也会对电动汽车电池寿命造成一定影响;常规充电模式下充电电流小,充电功率小,电动汽车充电所需时间长,相应充电设施造价低,对电网负荷冲击小。

2) 充电行为特性

电动私家车具有行驶目的地相对固定、停车时间长等出行特征,主要充电场所为居民区、工作区、大型商场等充电站,出行结束在居民区充电站主要充电方式为常规充电,充电起始荷电状态(State Of Charge, SOC)满足 $N(0.5, 0.1^2)$;出租车日运行里程大,充电时间短且集中,白天一般选择在中午休息期间进行快速充电,充电起始荷电状态满足 $N(0.5, 0.1^2)$ 。

3) 用户行驶特性

基于美国家庭出行调查(National Household Travel Survey, NHTS^[28])中汽车出行相关数据,以用户出行结束时刻作为电动汽车起始充电时刻,通过拟合得到电动汽车起始充电时刻的概率密度函数,如式(2)。

$$f_s(t) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t_s - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2)$$

式中: t_s 为起始充电时刻; μ_s 和 σ_s 分别为函数的期望值和标准差。

4) 充电时长

充电时长由电动汽车的电池容量、充电前的电池荷电状态以及充电功率等因素决定,如式(3)。

$$T_c = \frac{(1 - C_{soc})E}{\lambda P} \quad (3)$$

式中: T_c 为充电时长,单位为 h; C_{soc} 为充电起始荷电状态; E 为电动汽车电池容量,单位为 kWh; λ 为充电效率,一般取 0.9; P 为充电功率,单位为 kW。

2.2.2 基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷预测

蒙特卡洛方法基于概率和统计理论中的大数定律,是一种使用随机数解决问题的数值计算方法,当所求解问题的变量服从一定的概率分布,可以通过随机抽样确定模型中所需参数,进而求得近似解。

虽然单辆电动汽车出行行为难以确定, 但分析大规模汽车出行规律可以得到规模化电动汽车的出行特性与一定的概率模型相联系, 因此基于对应变量的概率函数分布利用蒙特卡洛方法随机抽取大量电动汽车出行行为, 能够实现电动汽车充电负荷预测。

图 4 是采用蒙特卡洛方法对光储充电站充电负荷仿真计算的流程图。

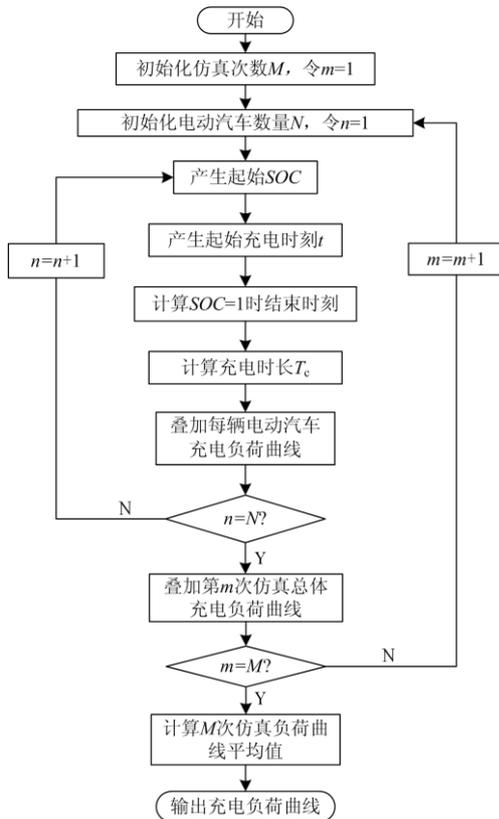


图 4 基于蒙特卡洛方法的电动汽车充电负荷预测流程图

Fig. 4 Flow chart of electric vehicle charging load prediction based on Monte Carlo method

具体步骤如下:

1) 初始化电动私家车和电动出租车数量、电动汽车电池容量、充电功率和仿真次数等参数;

2) 随机抽取单辆电动汽车起始充电时刻和起始荷电状态, 设定电动汽车充电至满电状态, 计算电动汽车充电时长, 进而得出电动汽车充电结束时刻;

3) 单辆电动汽车充电负荷迭代叠加得到一天中所有电动汽车的充电负荷, 如式(4)。

$$P_{EV,t}^m = \sum_{n=1}^N P_{cn,t}, \quad t = 1, 2, \dots, 1440 \quad (4)$$

式中: $P_{EV,t}^m$ 为第 m 次仿真 t 时刻光储充电站所有电动汽车充电负荷, 单位为 kW; N 为电动汽车数量,

单位为辆; 1440 表示将 24 h 划分为 1440 min; $P_{cn,t}$ 表示第 n 辆电动汽车在 t 时刻的充电功率, 单位为 kW。

4) 将每次仿真得到的充电负荷累加, 仿真结束时得到总充电负荷, 计算每次仿真的电动汽车充电负荷平均值作为充电负荷曲线, 如式(5)。

$$P_{EV,t} = \frac{\sum_{m=1}^M P_{EV,t}^m}{M} \quad (5)$$

式中: M 为仿真总次数; $P_{EV,t}$ 为仿真结束得到的一天中 t 时刻的电动汽车充电负荷, 单位为 kW。

2.3 能量调度模型

未配备储能时, 光储充电站的总体充放电策略为: 光伏系统输出功率大于充电负荷时, 多余电能入网, 光伏系统输出功率小于充电负荷时, 负荷不足部分由电网提供。配置储能时, 将一天划分为两个时段, 光储充电站充放电策略为: 00:00—08:00 时段, 电价位于低谷时段^[29], 低电量储能电池组只充电, 光伏出力大于充电负荷时, 在保障充电负荷的基础上由光伏和电网依次向储能供电; 光伏出力小于充电负荷时, 依次由光伏系统和电网向电动汽车和储能电池组供电; 08:00—24:00 时段, 光伏出力大于充电负荷时能量调度和 00:00—8:00 一样, 光伏出力小于负荷时, 优先由储能向负荷供电, 储能最大放电功率小于缺额功率时由电网补充。

2.4 蓄电池充放电特性

光储充电站中储能系统充放电受储能电池荷电状态影响, 假设单位时间 T 内蓄电池输出功率, 下一时刻储能蓄电池电量和荷电状态分别为

$$E_{bat}^{t+1} = E_{bat}^t + P_{bat,t} T \quad (6)$$

$$Soc_{t+1} = Soc_t + \frac{P_{bat,t} T}{S_{bat}} \quad (7)$$

式中: E_{bat}^t 和 E_{bat}^{t+1} 分别为充电前后两个时刻储能电量, 单位为 kWh; Soc_t 和 Soc_{t+1} 分别为充电前后两个时刻储能电池荷电状态; $P_{bat,t}$ 为 t 时刻储能充放电功率, 单位为 kW, 充电时为正值, 放电时为负值; S_{bat} 为储能电池容量, 单位为 kWh; T 为前后两个时刻的时间间隔, 单位为 h。

3 考虑电动汽车有序充电的储能容量配置建模

3.1 目标函数

电力需求的多样性和不确定性, 使得按满足客户最大需求设置的发供电能力, 在需求低谷时段大

量被闲置, 不仅增加了发供电成本, 而且也增加了客户的电费负担, 因此文中以一天中电网出力负荷峰谷差最小为目标函数。

$$\min F = \max(P_{\text{grid},t}) - \min(P_{\text{grid},t}) \quad (8)$$

$$P_{\text{grid},t} = P_{\text{basic},t} + P_{\text{char},t} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{grid},t}$ 为 t 时刻居民区电网总出力; $P_{\text{char},t}$ 为 t 时刻光储充电站电网母线出力; $P_{\text{basic},t}$ 为 t 时刻居民区日常规负荷。单位均为 kW。

3.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_{\text{pv},t} + P_{\text{char},t} = P_{\text{EV},t} + P_{\text{bat},t} \quad (10)$$

2) 储能荷电状态约束

$$Soc_{\min} \leq Soc \leq Soc_{\max} \quad (11)$$

式中, Soc_{\min} 和 Soc_{\max} 分别为储能电池荷电状态最小值和最大值, 取为 0.1 和 0.9。

3) 储能充放电功率约束

$$-P_{\max} \leq P_{\text{bat},t} \leq P_{\max} \quad (12)$$

式中, P_{\max} 为储能最大充电功率, 单位为 kW。

充放电功率过小可能导致储能电池组充电时间过长, 蓄电池电量长期处于低荷电状态, 降低蓄电池利用率。充放电功率过大可能降低蓄电池电导率, 降低电池功率输出能力。选择储能蓄电池最大充放电功率为储能电池组额定容量的 20%, 则最大充放电功率为

$$P_{\max} = 0.2 \frac{S_{\text{bat}}}{T_1} \quad (13)$$

式中, T_1 为时间, 数值为 1, 单位为 h。

4) 起始充电时刻约束

有序充电时电动汽车起始充电时刻 t_s 可能与出行结束时刻 t_{q1} 不一致, 以第二天出行开始时刻 t_{j0} 作为最晚充电结束时刻, 假设电动汽车都充满电, 那么对应的起始充电时刻为

$$t_{q2} = t_{j0} + 24 - T_c \quad (14)$$

其中, 有序充电时每辆电动汽车起始荷电状态与无序充电时一样, 充电时长 T_c 也没有差异。

因此有序充电时每辆电动汽车起始充电时刻满足式(15)。

$$t_{q1} \leq t_s \leq t_{q2} \quad (15)$$

3.3 考虑有序充电的光储充电站储能容量优化策略

粒子群算法是受飞鸟集群觅食行为规律性启发的一种智能优化算法, 它从随机解出发, 通过追踪个体极值和群体极值不断迭代更新粒子速度和位

置, 寻找全局最优解。文中运用粒子群算法求解考虑电动汽车有序充电的光储充电站最优储能容量流程如图 5 所示。

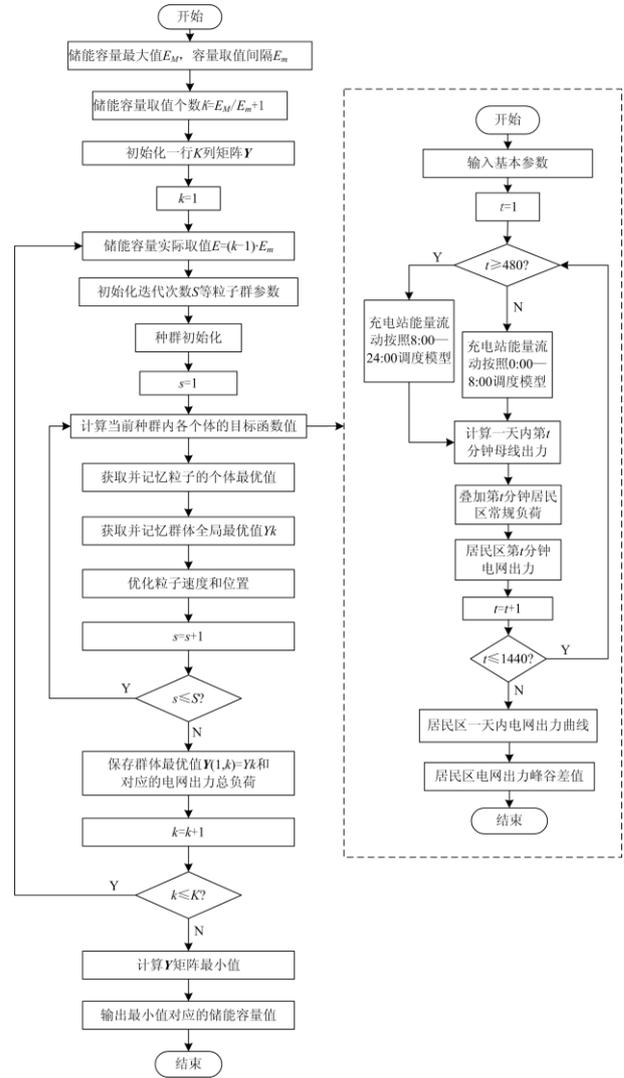


图 5 基于粒子群算法求解有序充电下最优储能容量流程图
Fig. 5 Flow chart of solving optimal energy storage capacity under orderly charging based on particle swarm algorithm

1) 首先确定储能电池容量最大值 E_M , 确定取值间隔 E_m , 等间隔计算储能电池容量分布, 确定可取容量个数 K , 可取容量大小为 E , 选取给定储能电池容量最小值。

2) 设置总迭代次数为 S , 初始化一行 K 列矩阵 Y 保存不同储能容量下目标函数值, 将电动私家车起始充电时刻作为不断更新的粒子位置, 每一次迭代得到一条电动私家车充电负荷曲线, 与电动出租车无序充电负荷相加得到电动汽车总体充电负荷,

根据能量调度模型调控储能电池系统和充电站母线的能量流动, 由此计算光储充电站母线出力, 叠加居民区基础负荷得到居民区总负荷, 在粒子群算法中更新粒子位置即电动私家车起始充电时刻, 不断更新迭代次数 s 达到最大次数 S , 将迭代过程中出现的居民区总负荷峰谷差最小值 Y_k 作为当前储能容量下的目标函数值 $Y(1, k)$ 。

3) 更新储能容量取值 E , 返回步骤 2), 得到所有储能容量下目标函数值, 比较得到最优储能容量。

4 案例分析

4.1 仿真设置

文章研究位于居民区的光储充电站, 充电站服务车辆主要是出行结束的居民电动私家车, 日间有少量电动出租车进行快速充电, 设置每天在充电站充电的电动私家车数量为 150 辆, 电动出租车数量为 15 辆, 研究车型选用市场销售量大的 BYD 系列的 BYDe6, 并假定电动私家车和出租车电池特性相同, 电池容量为 82 kWh, 私家车充电功率为 7 kW, 一天中出行结束时刻满足 $N(17.6, 3.4^2)$, 无序充电时将出行结束时刻作为起始充电时刻, 出行开始时刻满足 $N(7, 0.5^2)$, 出租车充电功率为 60 kW, 起始充电时刻满足 $N(13, 1^2)$, 两种电动汽车每次充电都充至满电量, 充电效率均为 90%, 电动出租车不进行有序充电。

4.2 仿真结果分析

由 4.1 节电动汽车的参数设置利用 2.2.2 节所述蒙特卡洛方法对充电站一天内电动汽车充电负荷进行仿真预测, 预测结果如图 6 所示。无序充电时光储充电站充电负荷主要集中在 18:00—24:00, 负荷峰值出现在 21:00 左右, 达到 678.16 kW, 白天受出租车集聚充电影响, 13:00 左右负荷出现一个小峰值, 这一充电负荷分布情况与实际情况较为相符。

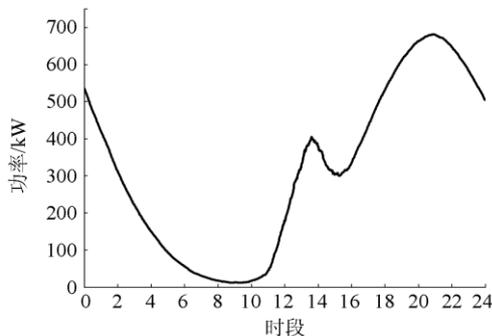


图 6 充电站一天内电动汽车无序充电负荷曲线
Fig. 6 Unordered charging load curve of EV in a charging station within a day

仿真计算时根据未考虑储能配置时能量调度模型, 得到不考虑储能无序充电下充电站母线电网出力和充电站所在区域电网总出力如图 7 所示。可以看出, 07:00—12:00 充电站母线出力为负值, 这一时间段光伏功率大于电动汽车充电功率, 无储能无序充电模式下充电站母线出力在晚间 21:00 左右达到峰值, 与居民区常规负荷高峰时段重叠, 峰上加峰, 居民区总负荷峰值功率达到 5 974.521 72 kW, 负荷叠加后对负荷谷值有一定抬升, 但并不明显, 峰谷差值为 5 021.711 72 kW。总体来看, 不考虑储能时电动汽车无序充电加剧了电网出力峰谷差, 负荷峰值加大, 可能造成线路过载、配变容量不足等问题。

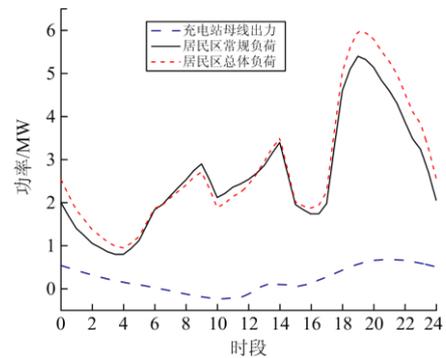


图 7 居民区常规负荷和无序充电下居民区总负荷
Fig. 7 Total load in residential area under conventional load and unordered charge

配置储能容量时考虑将白天光伏剩余电能全部储存起来^[30], 计算得 903.83 kWh, 设置储能最大取值为 1 000 kWh, 储能电池容量取值间隔为 50 kWh。

利用 3.3 节所述粒子群算法计算配置不同容量储能进行有序充电时居民区电网总负荷峰谷差, 如表 1 所示。可以看出, 在储能容量为 850 kWh 时峰谷差值最小, 降到 3 985.131 72 kW。根据表中数据对所得数据进行线性拟合和多项式拟合如图 8 所示, 随储能容量增大, 居民区总负荷峰谷差值虽然不断波动但总体呈减小趋势。

对比无储能无序充电、无储能有序充电和储能最优容量下居民区电网出力如图 9 所示。后面两种情况下电网出力峰谷差相比无储能无序充电时分别下降了 15.35% 和 20.65%, 可以得出: 充电站通过调控电动汽车有序充电和添加储能装置都能有效降低电网负荷峰谷差; 在降低电网负荷峰谷差方面, 有序充电相比储能容量优化效果更好, 储能装置另一个重要的作用是消纳日间光伏出力, 实现离网运行或配电网故障下充电站运行。

表 1 不同储能容量下居民区总负荷峰谷差

Table 1 Peak and valley difference of total load in residential area under different energy storage capacity

储能容量/kWh	峰谷差值/kW	储能容量/kWh	峰谷差值/kW
0	4 251.102 858	550	4 248.067 894
50	4 229.673 996	600	4 046.731 72
100	4 167.731 72	650	4 037.473 996
150	4 141.531 72	700	4 084.865 86
200	4 202.816 272	750	4 142.731 72
250	4 056.673 996	800	4 154.645 134
300	4 193.269 928	850	3 985.131 72
350	4 054.731 72	900	3 993.4
400	4 180.131 72	950	4 102.731 72
450	4 131.445 134	1 000	3 986.4
500	4 087.731 72	—	—

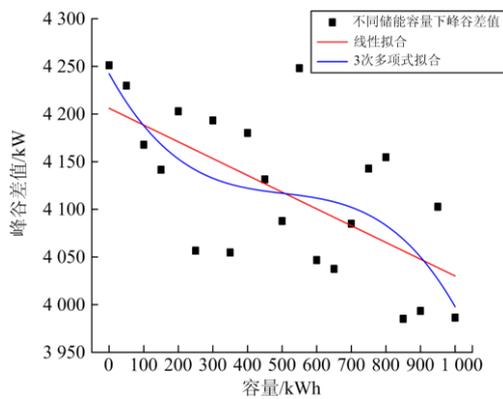


图 8 负荷峰谷差随储能容量变化数据拟合

Fig. 8 Load peak-valley difference with the change of energy storage capacity data fitting

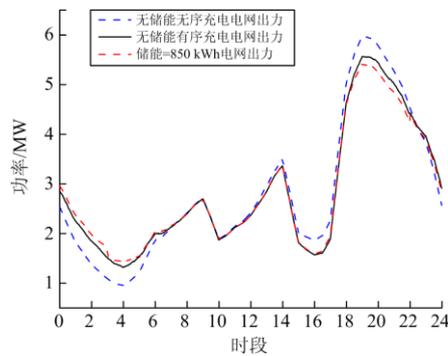


图 9 无储能无序充电、有序充电和储能最优容量下居民区电网出力

Fig. 9 Residential grid output under the conditions of non-energy storage disordered charging, orderly charging and optimal energy storage capacity

5 结论

文中基于充电站电动汽车充电负荷预测和光伏出力预测提出一种考虑电动汽车有序充电的居民区光储充电站储能容量优化策略,通过合理设置电动汽车、光伏和储能系统参数,仿真分析得到如下结论:

1) 基于充电站电动汽车充电负荷预测和光伏出力预测,采用无储能时能量调度模型计算了无序充电下充电站母线出力,叠加居民区常规负荷得到无序充电下居民区电网总负荷。分析表明,无储能无序充电时电网负荷峰上加峰,峰谷差加大,降低了电力系统运行稳定性。

2) 提出一种考虑电动汽车有序充电的居民区光储充电站储能容量优化策略并应用于具体的案例进行仿真。分析仿真结果可以得到,无储能有序充电和储能最优容量下电网出力峰谷差相比无储能无序充电时分别下降了 15.35%和 20.65%,通过调控电动汽车有序充电和添加储能装置能有效降低电网负荷峰谷差,增加电力系统运行稳定性。文章所提策略为光储充电站的储能容量配置提供了参考。

参考文献

[1] 胡棚渊, 谭泽富, 邱刚, 等. 电动汽车发展综述[J]. 电气应用, 2018, 37(20): 79-85.
 HU Jingqiu, TAN Zefu, QIU Gang, et al. Overview of the development of electric vehicles[J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(20): 79-85.

[2] 冯乙峰, 刘博, 陈娥, 等. 考虑可再生能源的充电站规划研究[J]. 黑龙江电力, 2019, 41(3): 220-226.
 FENG Yifeng, LIU Bo, CHEN E, et al. Research on charging station planning considering renewable energy[J]. Heilongjiang Electric Power, 2019, 41(3): 220-226.

[3] 王盛强, 李婷婷. 新能源光伏汽车充电站发展现状与分析[J]. 科技创新与应用, 2016(2): 106-107.
 WANG Shengqiang, LI Tingting. Development status and analysis of new energy photovoltaic vehicle charging station[J]. Technology Innovation and Application, 2016(2): 106-107.

[4] 杨翮, 张林强, 孙可, 等. 法国可再生能源区域发展政策的研究[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 241-246.
 YANG Xuan, ZHANG Linqiang, SUN Ke, et al. Analysis on regional development policy of renewable energy in France[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 241-246.

[5] 王跃峰. 德国新能源发电发展和运行研究[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 112-121.
 WANG Yuefeng. Research on development and operation of

- renewable energy generation in German[J]. *Electric Power*, 2020, 53(5): 112-121.
- [6] 应飞祥, 徐天奇, 李琰, 等. 含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21): 92-100.
YING Feixiang, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on day-to-day scheduling optimization strategy of a commercial virtual power plant with an electric vehicle charging station[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21): 92-100.
- [7] PREM P, SIVARAMAN P, SAKTHI SURIYA RAJ J S, et al. Fast charging converter and control algorithm for solar PV battery and electrical grid integrated electric vehicle charging station[J]. *Automatika*, 2020, 61(4): 614-625.
- [8] 吴万禄, 韦钢, 谢丽蓉, 等. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(15): 65-73.
WU Wanlu, WEI Gang, XIE Lirong, et al. Coordinated planning of distribution network containing charging station and distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(15): 65-73.
- [9] 郝越. 基于遗传算法的新能源充电站能量优化管理[J]. *通信电源技术*, 2019, 36(11): 27-28, 31.
HAO Yue. Energy optimization management of new energy charging station based on genetic algorithm[J]. *Telecom Power Technology*, 2019, 36(11): 27-28, 31.
- [10] 赵德仁, 丁雷, 徐立华, 等. 面向新能源消纳的主动配电网电动汽车充放电功率和网络重构协调优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(8): 94-101.
ZHAO Deren, DING Lei, XU Lihua, et al. Coordinated optimal dispatching of EV charging/discharging power and network reconfiguration in active distribution network for renewable energy accommodation[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(8): 94-101.
- [11] HAKIMI S M, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Optimal planning of a smart microgrid including demand response and inter-mittent renewable energy resources[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(6): 2889-2900.
- [12] 刘波, 何珉, 谭丹. 考虑电动汽车的主动配电网储能优化配置[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(6): 47-51.
LIU Bo, HE Min, TAN Dan. Optimal allocation of energy storage in active distribution network considering electric vehicle[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(6): 47-51.
- [13] 李顺昕, 岳云力, 武冰清. 与需求响应联合优化的联网型微电网储能容量随机规划[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(2): 124-130.
LI Shunxin, YUE Yunli, WU Bingqing. Grid-connected micro grid energy storage system capacity stochastic planning jointly optimized with demand response[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(2): 124-130.
- [14] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 考虑热电综合利用的光伏储氢独立供能系统容量优化配置[J]. *中国电力*, 2020, 53(10): 66-73.
XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal capacity configuration of solar-hydrogen independent power-supply system considering electricity-heat comprehensive utilization[J]. *Electric Power*, 2020, 53(10): 66-73.
- [15] 郜宁, 张慧媛, 王子琪, 等. 区域电网分布式储能选址定容规划[J]. *高压电器*, 2020, 56(8): 52-58.
GAO Ning, ZHANG Huiyuan, WANG Ziqi, et al. Planning for site selection and capacity determination of distributed energy storage in regional power grid[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(8): 52-58.
- [16] 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.
- [17] 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.
WU Jie, WEN Chenyang, LI Shan, et al. Optimal allocation of PV and accumulator system based on time-of-use price[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2018, 37(1): 23-30.
- [18] 张怡, 唐蕾. 电动汽车充电站储能优化配置研究综述[J]. *电工电气*, 2020(1): 1-7.
ZHANG Yi, TANG Lei. Review on energy storage optimization configuration of electric vehicle charging station[J]. *Electrotechnics Electric*, 2020(1): 1-7.
- [19] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(3): 140-148.
MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(3): 140-148.
- [20] RAMOS M E, RAZEGHI G, ZHANG L, et al. Electric vehicle charging algorithms for coordination of the grid and distribution transformer levels[J]. *Energy*, 2016, 113: 930-942.

[21] 王毅, 王飞宏, 侯兴哲, 等. 住宅区电动汽车充电负荷随机接入控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 53-60.
WANG Yi, WANG Feihong, HOU Xingzhe, et al. Random access control strategy of charging for household electric vehicle in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 53-60.

[22] 张媛媛, 撒奥洋, 于立涛, 等. 计及需求响应和电动汽车调度的 CHP 微网优化运行[J]. 广东电力, 2020, 33(8): 36-45.
ZHANG Yuanyuan, HAN Aoyang, YU Litao, et al. Optimal operation of CHP microgrid considering demand response and electric vehicle dispatching[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 36-45.

[23] 陈奎, 马子龙, 周思宇, 等. 电动汽车两阶段多目标有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 65-72.
CHEN Kui, MA Zilong, ZHOU Siyu, et al. Charging control strategy for electric vehicles based on two-stage multi-target optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 65-72.

[24] 马立新, 徐嘉辉, 杨天笑. 基于 MPSO 算法含电动汽车的微网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8): 116-122.
MA Lixin, XU Jiahui, YANG Tianxiao. Optimal scheduling of microgrid with electric vehicles based on MPSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 116-122.

[25] 蒋怡静, 于艾清, 黄敏丽. 考虑用户满意度的电动汽车时空双尺度有序充电引导策略[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 122-130.
JIANG Yijing, YU Aiqing, HUANG Minli. Coordinated charging guiding strategy for electric vehicles in temporal-spatial dimension considering user satisfaction degree[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 122-130.

[26] 李朝晖, 艾瑶瑶, 宋宁希, 等. 基于电池储能的光伏充电站经济性评估[J]. 电器与能效管理技术, 2018(1): 33-38, 59.
LI Zhaohui, AI Yaoyao, SONG Ningxi, et al. Economic evaluation of photovoltaic charging station based on battery energy storage[J]. Electric Appliance and Energy Efficiency Management Technology, 2018(1): 33-38, 59.

[27] 成健. 电动汽车光伏电站光储容量优化配置及保护研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
CHENG Jian. Research on optimal configuration and protection of photovoltaic charging station for electric vehicle[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.

[28] Department of Transportation. National household travel survey 2017[R]. U.S. Department of Transportation, 2018.

[29] 河南省发展和改革委员会. 河南省发展和改革委员会关于 2018 年电价调整有关事项的通知[EB/OL]. [2018-04-20].<http://www.hndrc.gov.cn/2018/04-20/721997.html>.
Development and Reform Commission of Henan Province. Notice of the Development and Reform Commission of Henan Province on matters related to the adjustment of electricity Price in 2018[EB/OL]. [2018-04-20].<http://www.hndrc.gov.cn/2018/04-20/721997.html>.

[30] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.
XU Jian, LIU Nian, YU Lei, et al. Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 29-37.

收稿日期: 2020-10-27; 修回日期: 2021-01-26

作者简介:

李景丽(1983—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 从事电磁场数值计算方法、电力系统过电压与接地技术及绝缘技术、电动汽车充电负荷建模与控制等研究; E-mail: lijingli1022@zzu.edu.cn

时永凯(1997—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统过电压与接地技术、电动汽车充电负荷建模与控制等研究; E-mail: 2839343026@qq.com

张琳娟(1985—), 女, 博士, 高级工程师, 从事电动汽车有序充电、充电网络规划、智慧能源控制、车联网等研究。E-mail: zlinj@163.com

(编辑 魏小丽)