

# 满足电动汽车快充需求的含储能复合型 充电站充电优化策略

侯慧<sup>1</sup>,王逸凡<sup>1</sup>,黄亮<sup>1,2</sup>,陈跃<sup>1</sup>,谢长君<sup>1</sup>,张锐明<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 自动化学院,湖北 武汉 430070;

2. 复变时空(武汉)数据科技有限公司,湖北 武汉 430070;

3. 广东广顺新能源动力科技有限公司,广东 佛山 528000)

**摘要:**电动汽车(EV)快速充电站的功能正逐步向集成风光储等综合能源的复合型充电站方向发展,选择一种能够提高快速充电系统各方效益的充电优化策略有助于推广EV及新能源产业。在此背景下,通过电价激励手段,制定了提高EV与复合型充电站综合效益的充电优化策略。首先,基于EV充电时间成本与充电经济成本建立了EV综合最优路径规划模型;然后,根据EV决策结果所得不同的快充负荷及车流量,各复合型充电站通过调度站内储能,构建了复合型充电站的效益优化模型,以EV综合成本最优及复合型充电站综合效益最优为双重优化目标。以某区域18 km×18 km路网为算例对所提优化策略进行仿真,结果表明所提优化策略可有效降低EV充电综合成本,并大幅提高复合型充电站的综合效益。

**关键词:**电动汽车;复合型充电站;路径规划;储能;可再生能源;充电优化

**中图分类号:**U 469.72

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202110013

## 0 引言

随着环境污染的加剧,有意识选择使用电动汽车(EV)的用户逐年增加。数量庞大的EV集群使得EV充电需求日益增长<sup>[1]</sup>。EV充电需求根据充电模式可分为慢充需求及快充需求。由于慢充的调度时间较长,为了达到调峰填谷等特定目标,大多研究都集中于慢充优化调度。文献[2]提出了一种考虑EV用户舒适度和充放电功率变化率的居民区EV与家庭互动的调度策略;文献[3]建立了由电网公司、充电站运营商和EV用户共同参与的有序充电模型。上述慢充调度主要针对调度时间较长的EV,没有涉及EV的空间转移特性。

快充需求显著区别于慢充需求之处在于,具有快充需求的EV具有更大的随机性,可在一定空间区域内根据EV用户的选择移动到不同的充电点。部分研究通过分析EV快充的影响因素,为具有快充需求的EV规划合理的充电路径,影响因素包括经济、时间、距离、能耗等<sup>[4-5]</sup>。但这部分研究大多仅从EV的角度规划最优充电站和路径,没有考虑充电站等其他充电参与方的利益。文献[6]提出了包含电力系统控制中心、智能交通系统中心、充电站和EV终

端的综合充电导航策略,但电力系统控制中心和智能交通系统中心仍仅为EV终端提供信息;文献[7]提出了以降低充电能量和时间成本为目标的分层导航策略,但仍是被动地通过调整EV充电负荷以实现降低峰值负荷的目的;文献[8]提出了以EV充电时间和充电成本最小为目标的充电导航框架,并在此基础上提出了模拟充电站竞争的非合作博弈定价策略,但仍然没有充分考虑充电站的利益。

充电站作为EV的能量补充环节,随着技术的发展,其功能也逐步向集成化、综合化的复合型充电站方向发展。文献[9]提出了集成光伏与储能装置的充电站的优化管理算法,利用储能装置优化快速充电站的运行成本,但忽略了EV充电成本;文献[10]提出了集成光伏与储能装置的快速充电站设计准则,但仅考虑了不同系统间的功率流动;文献[11]研究了考虑不确定性的高速公路光储充电站的选址定容问题。虽然上述文献对复合型充电站的设计及运行情况进行了研究,但是忽略了EV快充需求对复合型充电站运行效益的影响。

可见,目前大部分研究着重于合理调度EV时空秩序,而关于宏观处理EV与复合型充电站的协调优化研究相对较少。为此,本文提出了满足快充需求的含储能复合型充电站的充电优化策略。基于所提优化充电策略,EV能够以更优的充电综合成本选择目标充电站,同时通过合理调度储能出力以优化EV充电以及平抑可再生能源出力波动。算例仿真结果表明所提优化策略能够降低EV充电综合成本,并提高复合型充电站的综合效益,满足未来大规模EV快

**收稿日期:**2021-03-23;**修回日期:**2021-08-12

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(52177110);国家重点研发计划项目(2020YFB1506802,2018YFB0105700)

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(52177110) and the National Key R&D Plan Program of China(2020YFB1506802, 2018YFB0105700)

充的迫切需求。

## 1 充电优化策略架构

本文的快充场景描述如下:某区域内具有若干座充电站,部分复合型充电站可集成可再生能源与储能装置,并通过公共连接点 PCC(Point of Common Coupling)与电网互联,拓扑结构如附录 A 图 A1 所示。同时区域内不同时段、不同位置都有若干辆有快充需求的 EV。

本文所提充电优化策略可优化 EV 充电综合成本与复合型充电站综合效益,具体架构如图 1 所示,主要可分为 EV 路径规划阶段和复合型充电站优化调度阶段这 2 个阶段。

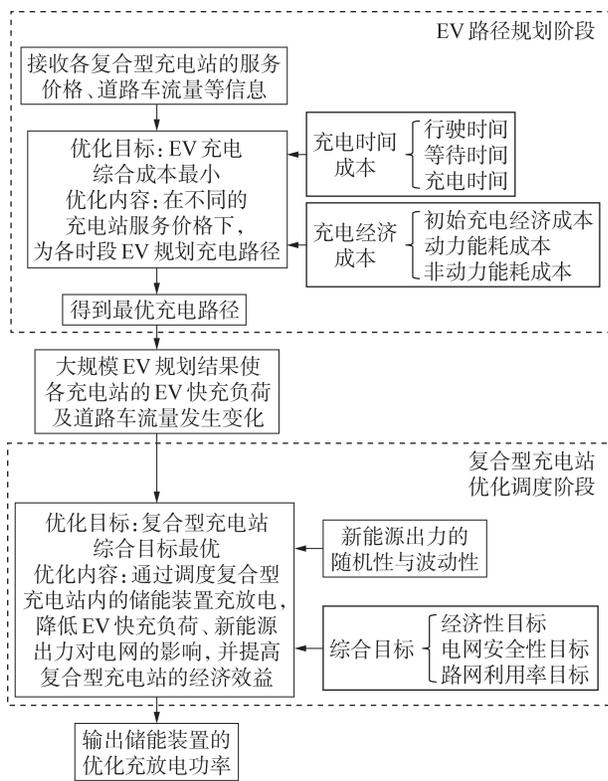


图 1 充电优化策略架构

Fig.1 Architecture of charging optimization strategy

阶段 1: EV 路径规划阶段。该阶段以 EV 为主体,为大规模 EV 规划最优充电路径,以满足 EV 快充需求。每辆 EV 都装设了车载智能终端,能够接收不同复合型充电站在不同时段发布的服务价格,结合道路车流量信息,利用智能终端的内载算法,为每辆 EV 规划得到最优充电路径,以最小化充电综合成本。

阶段 2: 复合型充电站优化调度阶段。复合型充电站内集成了可再生能源以及储能装置。阶段 1 完成了满足 EV 快充需求的充电路径合理引导。但由于 EV 快充需求具有短时效应,其带来的负面影响在阶段 1 中得到的抑制较小。因此,可通过充电站

内中央控制器调度站内的储能来降低 EV 快充需求带来的负面影响。此外,可再生能源出力具有随机性及波动性,中央控制器可通过调度站内储能装置使之得到一定的平抑。同时,通过储能装置对电能的转移,能够在一定程度上降低电价高峰时段的电能需求,提高复合型充电站的经济效益。

## 2 复合型充电站服务价格制定

定义复合型充电站的综合负荷为:

$$P_{in}^k(t) = P_b^k(t) - P_{re}^k(t) \quad (1)$$

式中:  $P_{in}^k(t)$ 、 $P_b^k(t)$ 、 $P_{re}^k(t)$  分别为时段  $t$  复合型充电站  $k$  的综合负荷、基础负荷、新能源出力。

根据充电站的综合负荷得到综合负荷均值,并定义综合负荷对复合型充电站服务价格的影响率,分别如式(2)和式(3)所示。

$$\bar{P}_{in}^k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{in}^k(t) \quad (2)$$

$$\eta_g^k(t) = 1 + \frac{P_{in}^k(t) - \bar{P}_{in}^k}{\bar{P}_{in}^k} \quad (3)$$

式中:  $\bar{P}_{in}^k$  为复合型充电站  $k$  的综合负荷均值;  $\eta_g^k(t)$  为时段  $t$  综合负荷对复合型充电站  $k$  服务价格的影响率;  $T$  为优化时段数。

在路网中,最可能发生拥堵的路段是与复合型充电站节点相连路网节点构成的路段。定义路段的健康车流量范围为  $[0.4C_{j_k}, 0.7C_{j_k}]$  ( $C_{j_k}$  为复合型充电站  $k$  与路网节点  $j_k$  相连路段的通行能力,  $j_k$  为与复合型充电站  $k$  相连的路网节点<sup>[12]</sup>),由此可得复合型充电站与路网节点相连路段的车流量不平衡量为:

$$\theta_{j_k}(t) = \begin{cases} f_{j_k}(t) - 0.4C_{j_k} & 0 < f_{j_k}(t) < 0.4C_{j_k} \\ 0 & 0.4C_{j_k} \leq f_{j_k}(t) \leq 0.7C_{j_k} \\ f_{j_k}(t) - 0.7C_{j_k} & 0.7C_{j_k} < f_{j_k}(t) < C_{j_k} \end{cases} \quad j_k \in J_k \quad (4)$$

式中:  $\theta_{j_k}(t)$  为时段  $t$  复合型充电站  $k$  与路网节点  $j_k$  相连路段的车流量不平衡量;  $J_k$  为与复合型充电站  $k$  相连路网节点集合;  $f_{j_k}(t)$  为时段  $t$  复合型充电站  $k$  与路网节点  $j_k$  相连路段的车流量。

根据各路段的车流量不平衡量,定义车流量不平衡量对复合型充电站服务价格的影响率为:

$$\eta_r^k(t) = 1 + \sum_{j_k \in J_k} \theta_{j_k}(t) / C_{j_k} \quad (5)$$

式中:  $\eta_r^k(t)$  为时段  $t$  的车流量不平衡量对复合型充电站  $k$  服务价格的影响率。

假设复合型充电站的分时电价为:在电网售电给充电站分时电价的基础上,各时段均提高一个合理的裕度。复合型充电站的服务价格是在充电站分时电价的基础上对各时段电价进行适当调整得到的。根据综合负荷与车流量对复合型充电站服务价

格影响率的数量关系,可以分为以下 2 种情况。

1) 当综合负荷与车流量对复合型充电站服务价格的影响率均大于等于 1 (小于等于 1) 时,对应的服务价格必定大于 (小于) 充电站的分时电价,表明电网及路网对充电站服务价格起到了相同的影响作用。此时,复合型充电站的服务价格可以表示为:

$$C_{\text{Service}}^k(t) = C_s(t) \eta_g^k(t) \eta_r^k(t) \quad (6)$$

式中:  $C_{\text{Service}}^k(t)$  为时段  $t$  复合型充电站  $k$  的服务价格;  $C_s(t)$  为时段  $t$  复合型充电站的分时电价。

2) 当综合负荷对复合型充电站服务价格影响率  $\eta_g^k(t) \geq 1$  且车流量对复合型充电站服务价格影响率  $\eta_r^k(t) \leq 1$  或者综合负荷对复合型充电站服务价格影响率  $\eta_g^k(t) \leq 1$  且车流量对复合型充电站服务价格影响率  $\eta_r^k(t) \geq 1$  时,表明电网与路网对充电站服务价格的影响相互矛盾,既可能造成 EV 响应电网需求而加剧路网车流量的不平衡率,也可能造成 EV 响应路网需求而加剧电网负荷的波动。因此,需要均衡考虑两者之间的关系,此时的服务价格可表示为:

$$C_{\text{Service}}^k(t) = C_s(t) (\eta_g^k(t) + \eta_r^k(t)) / 2 \quad (7)$$

### 3 EV 综合最优路径规划模型的建立

基于 EV 充电时间成本及充电经济成本建立 EV 综合最优路径规划模型以规划充电路径。

#### 3.1 EV 充电时间成本

EV 充电总时间主要包括 EV 行驶时间、EV 等待时间以及 EV 充电时间。

1) EV 行驶时间。EV 从出发点出发到达复合型充电站的行驶时间  $T_{\text{dr}}$  可表示为:

$$T_{\text{dr}} = \sum_{(i,j) \in U} T_{ij} \quad (8)$$

式中:  $U$  为 EV 到达复合型充电站的可行路径;  $T_{ij}$  为 EV 在路段  $(i,j)$  上的行驶时间,其计算方式可参考文献[12]。

2) EV 等待时间。EV 陆续到达复合型充电站后,按单队列进行排队。EV 从抵达复合型充电站到开始充电的等待时间取决于前方等待队列中 EV 充电所需时间以及处于充电状态的 EV 的剩余充电时间。则 EV 等待时间  $T_w$  可表示为:

$$T_w = \begin{cases} \sum_{k=1}^{n_w+1} \min \{ T_{k,1}, T_{k,2}, \dots, T_{k,n_c} \} & n_c = n_p, n_w > 0 \\ 0 & n_c < n_p, n_w = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $n_w$  为前方等待队列中 EV 的数量;  $n_c$  为处于充电状态的 EV 数量;  $n_p$  为复合型充电站内充电机的数量;  $T_{k,h}$  ( $h=1, 2, \dots, n_c$ ) 为第  $k$  批次处于充电状态的第  $h$  辆 EV 的剩余充电时间。

3) EV 充电时间。本文假设充电机充电功率保持恒定,即充电功率为恒定值  $P_{\text{ch}}$ ,EV 充电时间主要

与电池荷电状态 SOC (State Of Charge) 有关,即与 EV 能耗有关。电池 SOC 越低,则 EV 所需充电量越多,充电时间就越长。EV 充电时间  $T_{\text{ch}}$  可表示为:

$$T_{\text{ch}} = \frac{(S_{\text{max}}^{\text{EV}} - S_w^{\text{EV}})C - E_{\text{dr}} - e_i T_{\text{dr}}}{P_{\text{ch}}} \quad (10)$$

式中:  $S_{\text{max}}^{\text{EV}}$  为电池的最大 SOC,取值为 0.9;  $S_w^{\text{EV}}$  为 EV 提示充电时的 SOC,取值为 0.3<sup>[4]</sup>;  $C$  为电池容量;  $E_{\text{dr}}$  为 EV 前往复合型充电站路径中的能耗;  $e_i$  为  $t$  时段车载空调的能耗功率。

#### 3.2 EV 充电经济成本

EV 充电经济成本主要包括 EV 初始充电经济成本、EV 前往复合型充电站路径中的动力能耗成本及以车载空调为主的非动力能耗成本。

1) EV 初始充电经济成本  $C_{\text{in}}$  是指从 EV 提示充电到充满电量的经济成本,可表示为:

$$C_{\text{in}} = (S_{\text{max}}^{\text{EV}} - S_w^{\text{EV}}) C C_{\text{Service}}^k(t_c) \quad (11)$$

$$t_c = t_0 + T_{\text{dr}} + T_w \quad (12)$$

式中:  $t_0$  为 EV 充电需求产生时刻,即 EV 提示充电时刻;  $t_c$  为用户充电时刻;  $C_{\text{Service}}^k(t_c)$  为  $t_c$  时刻复合型充电站  $k$  的服务价格。

2) EV 动力能耗与许多因素有关,主要由路径长度、行驶速度、行驶时间、车辆参数、坡度等因素决定,其计算方法可参考文献[12]。EV 前往复合型充电站路径中的动力能耗成本  $C_{\text{pc}}$  可表示为:

$$C_{\text{pc}} = C_{\text{Service}}^k(t_c) \sum_{(i,j) \in U} E_{ij} \quad (13)$$

式中:  $E_{ij}$  为 EV 在路段  $(i,j)$  上的行驶能耗。

3) EV 的非动力能耗以车载空调能耗为主,温度与车载空调能耗之间的关系可参考文献[13]获得,则 EV 前往复合型充电站路径中的非动力能耗成本  $C_{\text{npc}}$  可表示为:

$$C_{\text{npc}} = C_{\text{Service}}^k(t_c) \sum_{t \in T_{\text{dr}} \cup T_w} e_i \Delta t \quad (14)$$

式中:  $\Delta t$  为单位时段时长,取值为 1 h。

#### 3.3 EV 综合最优路径规划模型

EV 综合最优路径规划模型的目标函数为:

$$C_{\text{sy}} = \min \{ C_{\text{in}} + C_{\text{pc}} + C_{\text{npc}} + \lambda (T_{\text{dr}} + T_w + T_{\text{ch}}) \} \quad (15)$$

式中:  $C_{\text{sy}}$  为 EV 充电综合成本;  $\lambda$  为时间成本折算系数,取值为 35 元/h<sup>[4]</sup>。

需满足的约束条件如下。

1) EV 剩余电量能够满足 EV 到达所选复合型充电站的行驶能耗要求,即:

$$(S_{\text{max}}^{\text{EV}} - S_w^{\text{EV}})C - E_{\text{dr}} - e_i T_{\text{dr}} > S_{\text{min}}^{\text{EV}} C \quad (16)$$

式中:  $S_{\text{min}}^{\text{EV}}$  为设定 EV 电池的最小 SOC,取值为 0.1<sup>[4]</sup>。

2) 路网中各路段的车流量约束。各路段的车流量不能超过该路段的通行能力,即:

$$0 < f_{ij}(t) < C_{ij} \quad i, j \in N \quad (17)$$

式中:  $f_{ij}(t)$  为时段  $t$  路段  $(i, j)$  的车流量;  $C_{ij}$  为路段  $(i, j)$  的通行能力;  $N$  为路网节点集合。

3) 路网中间节点选择约束。路网中间节点要求之后可选择节点必定是与该节点相连的节点, 且 EV 不会选择返回之前的节点, 则有:

$$\sum x_{qp} = 1 \quad q \in S_T, p \in N_q, p \notin S_T \quad (18)$$

式中:  $q$  为 EV 当前所处节点;  $p$  为下一备选节点;  $x_{qp}$  为 0-1 变量, 表示 EV 是否选择经过路段  $(q, p)$ , 若选择则取值为 1, 若不选择则取值为 0;  $S_T$  为 EV 已路过路网节点集合;  $q \in S_T$  表示将当前所处节点  $q$  归入 EV 已路过路网节点集合;  $p \notin S_T$  表示备选节点  $p$  不属于 EV 已路过路网节点集合;  $N_q$  为与节点  $q$  相连的路网节点集合。

#### 4 复合型充电站的效益优化模型

复合型充电站的效益优化模型主要包括 3 个目标, 分别为复合型充电站经济性目标、电网安全性目标、路网利用率目标。

1) 复合型充电站经济性目标以最大化复合型充电站的经济收益为目标, 可表示为:

$$\max F_{k,1} = \sum_{t=1}^T C_{\text{Service}}^k(t) P_{\text{ch}}^k(t) \Delta t - \sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}^k(t) \Delta t C_{\text{grid}}(t) - C_{\text{ES}}^k \quad (19)$$

$$C_{\text{ES}}^k = \sum_{t=1}^T k_{\text{ES}} (P_{\text{ES},c}^k(t) \eta_{\text{ES},c} + P_{\text{ES},d}^k(t) / \eta_{\text{ES},d}) \Delta t \quad (20)$$

式中:  $F_{k,1}$  为复合型充电站  $k$  的经济收益;  $P_{\text{ch}}^k(t)$  为时段  $t$  复合型充电站  $k$  的快充负荷;  $P_{\text{grid}}^k(t)$  为时段  $t$  复合型充电站  $k$  向电网购电功率, 即联络线功率,  $P_{\text{grid}}^k(t) > 0$  表示复合型充电站  $k$  向电网购电,  $P_{\text{grid}}^k(t) < 0$  表示复合型充电站  $k$  向电网售电;  $C_{\text{grid}}(t)$  为  $t$  时段电网的购售电价格;  $C_{\text{ES}}^k$  为复合型充电站  $k$  的储能成本<sup>[9]</sup>;  $k_{\text{ES}}$  为储能装置的充放电成本系数;  $P_{\text{ES},c}^k(t)$ 、 $P_{\text{ES},d}^k(t)$  分别为  $t$  时段储能装置的充电、放电功率;  $\eta_{\text{ES},c}$ 、 $\eta_{\text{ES},d}$  分别为储能装置的充电、放电效率。

2) 电网安全性目标以最小化联络线功率波动为目标, 可表示为:

$$\min F_{2,k} = \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^{T-1} (P_{\text{grid}}^k(t+1) - P_{\text{grid}}^k(t))^2 \quad (21)$$

式中:  $F_{2,k}$  为复合型充电站  $k$  的联络线功率波动。

3) 路网利用率目标以路网节点总体不平衡率最小为目标, 可表示为:

$$\min F_{3,k} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{j_k \in J_k} |\theta_{j_k}(t) / C_{j_k}| \quad (22)$$

式中:  $F_{3,k}$  为复合型充电站  $k$  的路网节点总体不平衡率。

复合型充电站运营商的主要目标是使复合型充

电站的综合效益最大化, 因此必须将电网安全性目标以及路网利用率目标的潜在效益转换为实际效益。假设电网与路网均给予复合型充电站一定的调度补贴, 以实现复合型充电站的综合效益最大化。则复合型充电站的目标函数可表示为:

$$\max F_k = F_{1,k} + c_1 \frac{F_2^{\max} - F_{2,k}}{F_2^{\max} - F_2^{\min}} + c_2 \frac{F_3^{\max} - F_{3,k}}{F_3^{\max} - F_3^{\min}} \quad (23)$$

式中:  $F_k$  为复合型充电站  $k$  的综合效益;  $F_2^{\max}$ 、 $F_2^{\min}$  分别为电网安全性目标的最大、最小值;  $F_3^{\max}$ 、 $F_3^{\min}$  分别为路网利用率目标的最大、最小值;  $c_1$ 、 $c_2$  为目标效益转换系数。

模型需满足如下约束条件。

1) 功率平衡约束。

$$P_{\text{grid}}^k(t) = P_{\text{b}}^k(t) - P_{\text{re}}^k(t) + P_{\text{ch}}^k(t) + P_{\text{es}}^k(t) \quad (24)$$

式中:  $P_{\text{es}}^k(t)$  为时段  $t$  复合型充电站  $k$  的储能装置功率,  $P_{\text{es}}^k(t) > 0$  表示储能装置充电,  $P_{\text{es}}^k(t) < 0$  表示储能装置放电。

2) 复合型充电站联络线功率约束, 即各复合型充电站的联络线功率必须限制在一定的范围内。

$$P_{\text{min}}^k \leq P_{\text{grid}}^k(t) \leq P_{\text{max}}^k \quad (25)$$

式中:  $P_{\text{max}}^k$ 、 $P_{\text{min}}^k$  分别为复合型充电站  $k$  的联络线功率上、下限。

3) 复合型充电站的服务价格约束。

$$C_{\text{min}} \leq C_{\text{Service}}^k(t) \leq C_{\text{max}} \quad (26)$$

式中:  $C_{\text{max}}$ 、 $C_{\text{min}}$  分别为复合型充电站服务价格的上、下限。

4) 储能装置功率与能量约束。

$$\begin{cases} S_{\text{min}} \leq S_k(t) \leq S_{\text{max}} \\ P_{\text{ES},d}^{\text{max}} \leq P_{\text{es}}^k(t) \leq P_{\text{ES},c}^{\text{max}} \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $S_k(t)$  为时段  $t$  复合型充电站  $k$  内储能装置的 SOC;  $S_{\text{max}}$ 、 $S_{\text{min}}$  分别为储能装置 SOC 的上、下限;  $P_{\text{ES},c}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{ES},d}^{\text{max}}$  分别为储能装置的最大充电、放电功率。

## 5 算例仿真

### 5.1 仿真设置

本文以某  $18 \text{ km} \times 18 \text{ km}$ <sup>[4]</sup> 区域内的实际路网为例验证所提充电优化策略的可行性。该路网包含 34 个节点、55 条路段。路网拓扑结构即复合型充电站位置<sup>[4]</sup>如附录 A 图 A2 所示。复合型充电站位于路网节点 5、7、20、24。各复合型充电站的基本参数如附录 A 表 A1 所示。本文假设各复合型充电站内包含 10 个储能单元, 相关参数如附录 A 表 A2 所示。

复合型充电站的基础负荷来源于文献[14]。风电、光伏等可再生能源出力曲线由 Homer 软件<sup>[15]</sup>仿真得到, 如附录 A 图 A3 所示。本文选取某一平均光照强度为  $4.32 \text{ kW} / \text{m}^2$ 、平均风速为  $4.87 \text{ m} / \text{s}$  的地区数据(由中国气象数据网得到), 在 Homer 软件中根

据内置模型随机模拟得到该地区的光照强度、风速预测数据,并随机选择某一夏季典型日的出力曲线作为可再生能源出力曲线来源。

复合型充电站的分时电价如附录 A 图 A4 所示<sup>[16]</sup>,其没有利用本文模型根据不同负荷及车流量情况对充电站各时段的电价进行调整。而复合型充电站服务价格是在电网售电分时电价的基础上,根据本文所建模型对充电站各时段的电价进行调整而得到。复合型充电站分时电价与服务价格对比可体现不同时段差异化激励电价的引导效果。

考虑到 EV 快充需求主要产生于白天,本文设置仿真周期为 06:00—18:00,以 1 min 为单位时段时长,共有 720 个时段。每个时段均有充电需求产生,且有 4400 辆 EV 接入。假设 EV 快充需求的空间分布满足均匀分布,时间分布近似服从正态分布<sup>[17]</sup>。

本文采用自适应搜寻者遗传算法<sup>[18]</sup>对所建模型进行优化求解。相较于传统智能算法(如传统遗传算法、蚁群算法、狼群算法等),自适应搜寻者遗传算法更具有针对性,更适宜处理路径搜索类问题。自适应搜寻者遗传算法利用搜寻者优化算法中的模糊思想改进变异算子,增强了种群多样性,加快了收敛速度。本文采用滚动时域优化方法<sup>[19]</sup>对所建模型的实时性进行处理,滚动优化周期为 4 h。

本文以节点 7 处的复合型充电站为例,设置如下 4 种场景验证所建模型的有效性。

1)场景 1:EV 基于本文所提模型选择复合型充电站,充电站可调整服务价格且配置了储能装置。

2)场景 2:EV 基于最短路径原则选择复合型充电站,充电站可调整服务价格且配置了储能装置。

3)场景 3:EV 基于本文所提模型选择复合型充电站,充电站内无储能装置且采用复合型充电站分时电价。

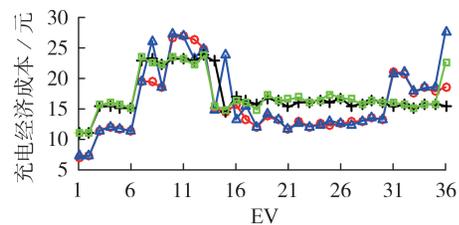
4)场景 4:EV 基于最短路径原则选择复合型充电站,充电站内无储能装置且采用复合型充电站的分时电价。

## 5.2 结果分析

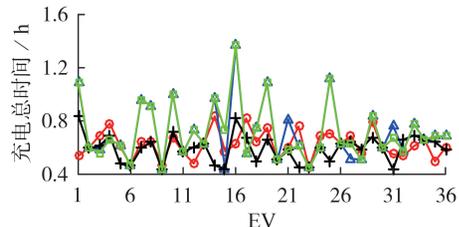
### 5.2.1 EV 充电成本分析

上述算例仿真设置了 4400 辆 EV,为了方便分析,本节根据时间顺序,均匀选取 36 辆接入节点 7 处复合型充电站的 EV(编号记为 1—36)为分析对象。4 种场景下的 EV 充电经济成本和充电总时间如图 2 所示,充电综合成本如表 1 所示。

图 2(a)显示除部分用户由于在电价较高时段完成充电使得配置储能场景下 EV 经济成本高于分时电价场景,其他用户的 EV 充电经济成本则是配置储能场景下的结果低于分时电价场景。结合图 2(a)和表 1 可知:场景 1 和场景 3 下的 EV 充电经济成本远低于场景 2 和场景 4,说明本文模型的 EV 充电经济



(a) 充电经济成本



(b) 充电总时间

—○— 场景 1, —△— 场景 2, —+— 场景 3, —□— 场景 4

图 2 EV 充电经济成本和充电总时间

Fig.2 Charging economic costs and total charging time of EVs

表 1 EV 充电综合成本

Table 1 Comprehensive charging cost of EVs

场景	平均充电经济成本 / 元	平均充电时间 / h	平均充电综合成本 / 元
1	21.85	0.45	37.51
2	25.05	0.47	41.35
3	20.75	0.49	37.96
4	25.09	0.50	42.46

成本低于基于最短路径原则的模型;场景 1 下的 EV 充电经济成本略高于场景 3,说明充电服务价格的制定能略微提高 EV 充电经济成本。结合图 2(b)和表 1 可知,场景 1 下 EV 充电时间的平均值和方差依次小于场景 2、场景 3、场景 4,说明采用本文所提模型能够降低 EV 充电时间成本,且调整充电服务价格也能有效改变 EV 充电时间。由表 1 可知,场景 1 和场景 3 的 EV 充电综合成本低于场景 2 和场景 4,说明采用本文所提模型能够有效降低 EV 充电综合成本。对比场景 1 和场景 3 可知,场景 3 的充电综合成本略高于场景 1,说明采用本文所提充电服务价格策略能够大幅降低充电时间成本,但仅能略微降低 EV 充电综合成本。

### 5.2.2 复合型充电站的综合效益分析

4 种场景下复合型充电站的联络线功率、车流量、综合效益如图 3 所示。4 种场景下复合型充电站的目标值结果如表 2 所示。

结合图 3 和表 2 可知:场景 1 下复合型充电站的联络线功率波动依次小于场景 2、场景 3、场景 4,场景 1 的电网安全性目标依次小于场景 2、场景 3、场景 4,说明本文所建模型及储能调度策略能够提高电网运行的安全性;4 种场景下的路网利用率目标

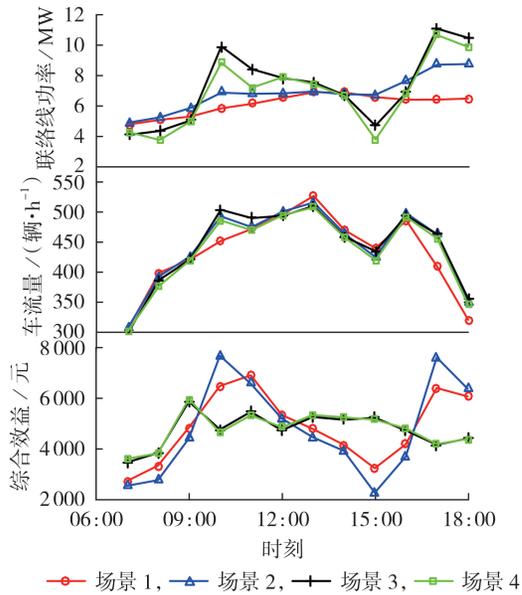


图3 复合型充电站的联络线功率、车流量、综合效益  
Fig.3 Tieline power, traffic flow and comprehensive benefit of composite charging station

表2 复合型充电站的目标值结果

Table 2 Objective value results of composite charging station

场景	综合效益 / 元	充电站经济性目标 / 元	电网安全性目标	路网利用率目标
1	58566.90	42661.80	0.08	0.33
2	57586.00	43991.70	0.32	0.32
3	57149.30	49749.10	4.94	0.32
4	57428.52	48765.10	4.83	0.30

值差异不大,且场景1的结果略高于其他3种场景;场景1下复合型充电站的综合效益大于其他3种场景,且场景1的电网安全性目标远低于其他3种场景,说明本文所提充电优化策略能够在提高复合型充电站综合效益的同时,大幅提高电网运行的安全性。

综上所述,本文所提满足EV快充需求的含储能复合型充电站的充电优化策略虽然略微提高了EV充电经济成本,但降低了EV充电综合成本;略微降低了复合型充电站的经济效益与路网利用率,但其电网安全性得到大幅提高。可见,所提策略能够提高EV与复合型充电站的综合效益。

## 6 结论

本文建立了考虑EV与复合型充电站效益的充电优化策略。通过复合型充电站服务价格的激励, EV能够以更优的充电综合成本选择目标复合型充电站。同时可通过合理调度站内储能来优化EV充电所带来的快充负荷与车流量。分析算例仿真结果可得到如下结论:

1)以复合型充电站服务价格作为激励手段,利用EV时空转移特性,能有效调动EV充电,优化复合

型充电站的综合效益;

2)综合充电经济成本和时间成本的EV综合最优路径规划模型能兼顾充电时间,降低了充电综合成本,提高了EV用户的充电满意度;

3)通过合理调度储能充放电,能减少EV快充负荷以及可再生能源出力随机性和波动性的影响,提高复合型充电站的综合效益。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 王毅,陈进,麻秀,等. 采用分群优化的电动汽车与电网互动调度策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):77-85.  
WANG Yi, CHEN Jin, MA Xiu, et al. Interactive scheduling strategy between electric vehicles and power grid based on group optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(5):77-85.
- [2] 邢紫佩,王守相,梅晓辉,等. 考虑电动汽车充放电全程功率变化率和用户舒适度的V2H调度策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):70-76.  
XING Zipei, WANG Shouxiang, MEI Xiaohui, et al. V2H scheduling strategy considering charging and discharging power change rate of electric vehicles and users' comfort level[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(5):70-76.
- [3] 林晓明,钱斌,肖勇,等. 考虑网商多方需求和决策行为特性的电动汽车有序充电[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):136-143.  
LIN Xiaoming, QIAN Bin, XIAO Yong, et al. Ordered charging of electric vehicles considering grid-station-user multi-party demands and decision-making behavior characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(3):136-143.
- [4] 苏粟,杨恬恬,李玉璟,等. 考虑实时动态能耗的电动汽车充电路径规划[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):136-147.  
SU Su, YANG Tiantian, LI Yujing, et al. Planning of electric vehicle charging path considering real-time dynamic energy consumption[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7):136-147.
- [5] CERNA F V, POURAKBARI-KASMAEI M, ROMERO R A, et al. Optimal delivery scheduling and charging of EVs in the navigation of a city map[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(5):4815-4827.
- [6] GUO Q L, XIN S J, SUN H B, et al. Rapid-charging navigation of electric vehicles based on real-time power systems and traffic data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(4):1969-1979.
- [7] XIA F Z, CHEN H K, CHEN L, et al. A hierarchical navigation strategy of EV fast charging based on dynamic scene[J]. IEEE Access, 2019,7:29173-29184.
- [8] TAN J, WANG L F. Real-time charging navigation of electric vehicles to fast charging stations: a hierarchical game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017,8(2):846-856.
- [9] CHAUDHARI K, UKIL A, KUMAR K N, et al. Hybrid optimization for economic deployment of ESS in PV-integrated EV charging stations[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018,14(1):106-116.
- [10] MACHIELS N, LEEMPUT N, GETH F, et al. Design criteria for electric vehicle fast charge infrastructure based on Flemish mobility behavior[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(1):320-327.
- [11] 赵峰,李建霞,高锋阳. 考虑不确定性的高速公路光储充电站选址定容[J]. 电力自动化设备,2021,41(8):111-117.

- ZHAO Feng, LI Jianxiao, GAO Fengyang. Siting and sizing of photovoltaic-storage charging stations on highway considering uncertainties[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(8):111-117.
- [12] 潘义勇,余婷,马健霄. 基于路段与节点的城市道路阻抗函数改进[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(8):76-81.
- PAN Yiyong, YU Ting, MA Jianxiao. Improvement of urban road impedance function based on section impedance and node impedance[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2017, 36(8):76-81.
- [13] YU L, JIANG T, ZOU Y L. Online energy management for a sustainable smart home with an HVAC load and random occupancy[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2):1646-1659.
- [14] 吕海灿,王伟峰,赵兵,等. 基于Wide & Deep-LSTM模型的短期台区负荷预测[J]. *电网技术*, 2020, 44(2):428-436.
- LÜ Haican, WANG Weifeng, ZHAO Bing, et al. Short-term substation load forecast based on Wide & Deep-LSTM model[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(2):428-436.
- [15] SAGANI A, VRETTAKOS G, DEDOUSSIS V. Viability assessment of a combined hybrid electricity and heat system for remote household applications[J]. *Solar Energy*, 2017, 151:33-47.
- [16] 王守相,张善涛,王凯,等. 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(1):125-132.
- WANG Shouxiang, ZHANG Shantao, WANG Kai, et al. Multi-objective optimal operation of distributed energy storage considering user demand response under time-of-use price[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(1):125-132.
- [17] 宋雨浓,林舜江,唐智强,等. 基于动态车流的电动汽车充电负荷时空分布概率建模[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23):47-56.
- SONG Yunong, LIN Shunjiang, TANG Zhiqiang, et al. Spatial-temporal distribution probabilistic modeling of electric vehicle charging load based on dynamic traffic flow[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23):47-56.
- [18] 张立毅,高杨,费腾,等. 求解旅行商问题的搜寻者遗传算法[J]. *数学的实践与认识*, 2019, 49(7):115-122.
- ZHANG Liyi, GAO Yang, FEI Teng, et al. Seeker genetic algorithm solving traveling salesman problem[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2019, 49(7):115-122.
- [19] 陈炜. 含电动汽车储能与分布式风力发电的虚拟发电厂优化运行[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(10):45-50, 59.
- CHEN Wei. Optimal operation of virtual power plant with electric vehicles and distributed wind farms[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(10):45-50, 59.

#### 作者简介:



侯慧

侯慧(1981—),女,湖北武汉人,副教授,博士,主要研究方向为电动汽车与电网互动等(**E-mail**:houhui@whut.edu.cn);

王逸凡(1997—),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充放电调度(**E-mail**:3449306787@qq.com);

黄亮(1980—),男,湖北武汉人,副教授,博士,主要研究方向为电动汽车电力设备开发(**E-mail**:35644519@qq.com)。

(编辑 陆丹)

## Charging optimization strategy of composite charging station with energy storage to meet fast charging demand of electric vehicles

HOU Hui<sup>1</sup>, WANG Yifan<sup>1</sup>, HUANG Liang<sup>1,2</sup>, CHEN Yue<sup>1</sup>, XIE Changjun<sup>1</sup>, ZHANG Ruiming<sup>3</sup>

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Transformer Space-time Data Technology Limited Company, Wuhan 430070, China;

3. Guangdong Guangshun Renewable Energy Technology Limited Company, Foshan 528000, China)

**Abstract:** The functions of rapid charging station for EVs (Electric Vehicles) are gradually developing towards the direction of composite charging station integrating comprehensive energy such as wind, photovoltaic, storage, and so on. Choosing a charging optimization strategy that can improve the benefits of all parties in the fast charging system is helpful to promote EVs and new energy industry. In this context, a charging optimization strategy is developed to improve the comprehensive benefits of EVs and composite charging stations by means of electricity price incentive. Firstly, the comprehensive optimal path planning model of EVs is established based on the charging time cost and charging economic cost of EVs. Then, according to the different fast charging load and vehicle flow obtained from EV decision results, the benefit optimization model of composite charging station is constructed by dispatching the energy storage in the station, with the optimal comprehensive cost of EVs and the optimal comprehensive benefit of composite charging stations as the dual optimization objectives. Taking an 18 km×18 km road network in a certain region as the example, the proposed optimization strategy is simulated, and the simulation results show that the proposed optimization strategy can effectively reduce the comprehensive charging cost of EVs and greatly improve the comprehensive benefit of composite charging stations.

**Key words:** electric vehicles; composite charging stations; path planning; energy storage; renewable energy; charging optimization

# 附录 A

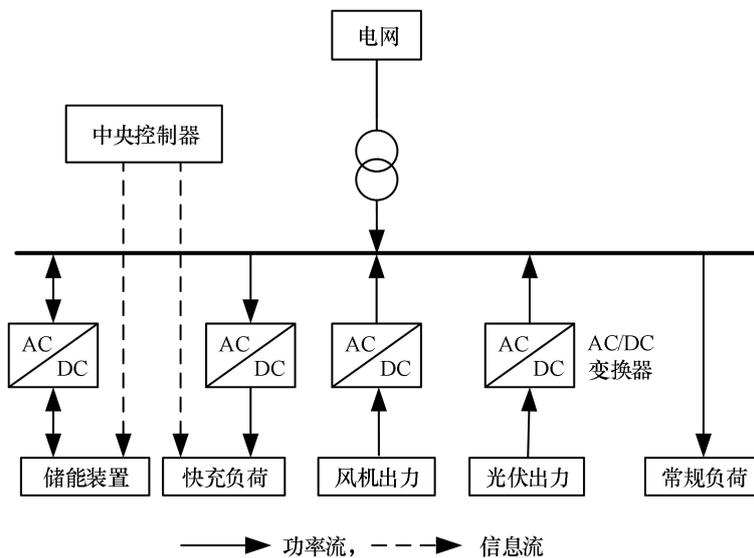


图 A1 复合型充电站结构  
Fig.A1 Structure of composite charging station

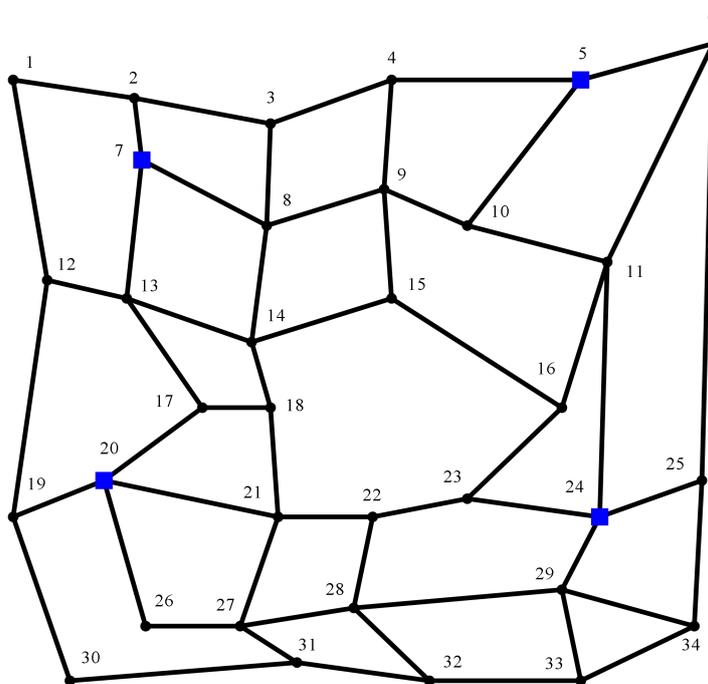


图 A2 路网结构示意图  
Fig.A2 Schematic diagram of road network structure

表 A1 复合型充电站参数  
Table A1 Parameters of composite charging station

所处节点	充电机数量/台	快充功率/kW	充电效率/%
5	25	60	92
7	23	60	92
20	27	60	92
24	26	60	92

表 A2 复合型充电站储能单元参数

Table A2 Parameters of energy storage unit in composite charging station				
储能单元数量/个	充放电功率/kW	容量/(MW·h)	充放电效率	SOC 范围
10	250	1	0.95	0.2~0.95

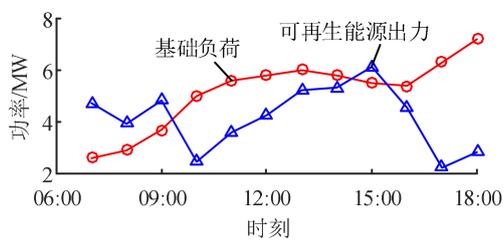


图 A3 基础负荷及可再生能源出力曲线

Fig.A3 Basic load and renewable energy output power curves

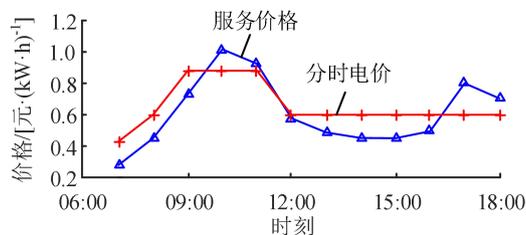


图 A4 复合型充电站的分时电价和服务价格

Fig.A4 Time-of-use electricity price and service price of composite char