

# 电动汽车典型快充站优化运行配置方法<sup>①</sup>



张璐璐<sup>1</sup>, 朱光云<sup>1</sup>, 施寅跃<sup>2</sup>, 柯慧敏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(海南电网有限责任公司, 海口 570100)

<sup>2</sup>(海南电网有限责任公司 海口供电局, 海口 570100)

<sup>3</sup>(国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106)

**摘要:** 为了降低大功率快充桩对电网冲击波动, 并考虑典型快充站分布式电源和储能优势, 提出一种电动汽车典型快充站优化运行配置方法. 通过分析站内分布式电源出力特点以及电动汽车充电行为规律, 以充电站运行成本最小为优化目标, 建立典型快充站优化运行配置模型, 以站内功率平衡、分布式电源出力等为约束条件, 利用遗传优化算法求解模型最优解. 最后通过不同配置算例验证所提方法的可行性, 为典型快充站的优化运行提供技术支撑.

**关键词:** 电动汽车; 典型快充站; 充电行为; 优化运行配置; 遗传优化算法

引用格式: 张璐璐, 朱光云, 施寅跃, 柯慧敏. 电动汽车典型快充站优化运行配置方法. 计算机系统应用, 2020, 29(8): 242-248. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7590.html>

## Optimal Operation and Configuration for Typical Fast-Charging Station of Electric Vehicle

ZHANG Lu-Lu<sup>1</sup>, ZHU Guang-Yun<sup>1</sup>, SHI Yin-Yue<sup>2</sup>, KE Hui-Min<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Hainan Power Grid Co. Ltd., Haikou 570100, China)

<sup>2</sup>(Haikou Power Supply Bureau, Hainan Power Grid Co. Ltd., Haikou 570102, China)

<sup>3</sup>(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** In order to reduce the impact fluctuation of high power fast-charging pile on the power grid, and considering the advantages of Distributed Generation (DG) and energy storage of typical fast-charging stations, an optimal operation configuration method for typical fast-charging stations of Electric Vehicles (EVs) is proposed. By analyzing the power output characteristics of the DG in the station and the charging behavior law of EVs, the optimal operation configuration model of typical fast-charging station is established taking the minimum operation cost of the charging station as the optimization objective. The optimal solution of the model is solved by genetic optimization algorithm with the constraints of the power balance in the station and the power output of the distributed power supply. Finally, the feasibility of the proposed method is verified by different configuration examples to provide technical support for the optimal operation of a typical fast-charging station.

**Key words:** electric vehicles; typical fast-charging station; charging behavior law; optimal operation and configuration; genetic optimization algorithm

## 引言

近几年, 电动汽车产业发展日新月异, 作为降低碳排放的重要手段, 我国电动汽车产销量快速增长<sup>[1]</sup>. 电动汽车的快速增长需配套一定规模的充电设施尤其大

功率快充桩, 快充设备接入会冲击电网安全运行, 影响用户用电质量<sup>[2,3]</sup>. 如何配置快充站, 保证站内多个快充桩和分布式电源及储能等设备的优化运行, 是今后研究重点.

① 基金项目: 中国南方电网科技项目 (070000KK52180020)

Foundation item: Technical Project of China Southern Power Grid Corporation (070000KK52180020)

收稿时间: 2020-01-15; 修改时间: 2020-02-13, 2020-02-27; 采用时间: 2020-03-29; csa 在线出版时间: 2020-07-29

文献 [4] 提出以降低周期运维成本为目标的电动汽车充电站优化设计方案, 电动汽车被假定作为智能能源枢纽与电网相连, 电动汽车车主对汽车行驶距离的“里程焦虑”问题; 文献 [5] 提出了一种基于博弈论的分散式电动汽车充电调度方案, 该方案能最大限度地降低用户的支付费用并提高电网效率, 为辅助服务提供最大的潜在容量; 文献 [6] 通过分析电网功率损失最小建立分布式电源及充电站选址安装规划模型; 文献 [7] 提出了一种混合整数非线性优化方法来优化快速充电站的布置和规模; 文献 [8] 设计了一种含风力发电的电动汽车充电站, 可以对电动汽车进行充电, 还可以平衡与之相连的电网的负荷需求; 文献 [9] 分析了电动汽车充电站整车充电、更换电池两种运营模式, 从其自身竞争力、盈利方式及对电网运行的影响等 3 个方面对这两种运营模式进行了比较分析; 文献 [10] 提出了基于区块链的电动汽车充电站充电权交易机制与模型, 确保配网的安全运行及充电权交易的公开透明与高效智能. 上述文献主要对传统充电站优化设计及优化运行研究, 但是对于含分布式电源及储能的快充站优化运行研究相对较少. 本文通过分析典型快充站内风电、光伏及电动汽车运行特点, 以充电站总运行成本最小为优化目标, 以站内总功率平衡、分布式电源容量限制、节点功率限制等为约束条件, 建立典型快充站优化运行配置模型, 利用遗传优化算法求解模型适应度最优值, 仿真算例表明该模型可充分利用站内分布式电源和储能优势, 降低大功率快充桩对电网冲击波动.

## 1 站内典型设备运行特性分析

### 1.1 电动汽车充电行为分析

电动汽车充电时长是影响快充站优化设计的一个因素. 充电时长与电池容量、充电功率等有关, 其表达式如下:

$$t_c = \frac{C_b \times (1 - SOC)}{P_c} \quad (1)$$

式中,  $t_c$  为充电时间,  $C_b$  为电池额定容量,  $P_c$  为平均充电功率, SOC 为电池荷电状态, 范围为 0~1.

通过分析充电桩数量及每个桩充电功率, 计算充电站总充电功率需求:

$$P_s(t) = \sum_{k=1}^{m_c} P_{c,k}(t) \quad (2)$$

式中,  $P_s$  为站内总充电功率,  $t$  为充电时刻,  $m_c$  为充电桩数量,  $P_{c,k}(t)$  为第  $k$  个充电桩在  $t$  时刻充电功率.

### 1.2 风力发电特性分析

风力发电机输出功率是随风速变化不可控的, 但是可以通过预测风速的分布情况来得到输出功率, 其典型输出功率模型为:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \\ av^2 + bv + c, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_{WT_r}, & v_r \leq v < v_{co} \\ 0, & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $P_{WT}$  为发电机组输出功率,  $P_{WT_r}$  为发电机组额定输出功率, 单位是 kW;  $v$  为实际风速,  $v_{ci}$  为切入风速, 为额定风速,  $v_{co}$  为切出风速, 单位是 m/s;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为发电机组功率特性参数.

在模拟过程中, 可以从一系列随机数中得到风速每小时的变化, 如下式所示:

$$v = -c[\ln(1-p)]^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

式中,  $p$  为随机数,  $c$  为比例因子,  $k$  为形状因子,  $c$  和  $k$  均由所处位置决定.

### 1.3 光伏太阳能

光伏电池为直流输出, 其输出电压和电流一般随电池上光照强度和温度的变化而变化, 光伏电池的输出功率模型为:

$$P_{PV}(t) = P_{\max} f(G(t))(1 + kT(t)) \quad (5)$$

式中,  $P_{PV}(t)$  为  $t$  时段内光伏电池输出功率,  $P_{\max}$  为  $t$  时段内光伏电池最大输出功率, 单位是 kW;  $G(t)$  为  $t$  时段内实际光照强度, 单位是  $\text{w/m}^2$ ;  $f(G(t))$  为光照强度概率密度函数;  $k$  为波尔兹曼常量, 有  $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $T(t)$  为  $t$  时段内实际温度, 单位是  $^{\circ}\text{C}$ . 光照强度  $G(t)$  概率密度函数如式 (6) 所示:

$$f(G(t)) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{G(t)}{G_{\max}}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{G(t)}{G_{\max}}\right)^{\beta} \quad (6)$$

式中,  $G_{\max}$  为  $t$  时段内最大光照强度, 单位是  $\text{w/m}^2$ ;  $\Gamma$  为 Gamma 函数;  $\alpha$ 、 $\beta$  为 Beta 分布的形状参数, 其值可根据  $t$  时段内实际光照强度的平均值  $\mu$  和方差  $\sigma$  计算出.

光伏电池最大输出功率函数为:

$$P_{\max} = V_{\max} I_{\max} = V_{\max} \left\{ I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{\max} + I_{\max} R_s}{nkT_{PV} N_s / q}\right) - 1 \right] - \frac{V_{\max} + I_{\max} R_s}{R_p} \right\} \quad (7)$$

式中,  $I_{ph}$  为光伏电池的光电流,  $I_0$  为二极管反向饱和电流, 单位是 A;  $R_s$  为等效串联电阻,  $R_p$  为等效并联电阻, 单位是  $\Omega$ ;  $n$  为二极管理想因子 ( $1 \leq n \leq 2$ );  $q$  为电荷量, 有  $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ;  $N_s$  为串联光伏单元个数;  $T_{PV}$  为电池温度, 单位是  $^{\circ}\text{F}$ .

## 2 优化配置建模

### 2.1 目标函数

文中所提出的目标函数中为最大净现值 (NPV), 即现金流入现值和现金流出现值之差, 也包括了使用期限内更换和维护电池的费用.

$$NPV = \sum_{h=1}^n \frac{C_h}{(1+i)^h} - I \quad (8)$$

$$C_h = \sum_{t=1}^{8760} (IN_{ft} - OUT_{ft}) - C_m \quad (9)$$

$$I = C_{st} \cdot Q_c + \sum_{k=1}^m (C_k \cdot Q_k \cdot y_k) + C_p \cdot S_p + C_s \cdot E_s \quad (10)$$

式 (8) 中,  $C_h$  为  $h$  年净现金流量,  $I$  为初始投资成本,  $i$  为年利率; 式 (9) 中,  $IN_{ft}$  为每小时内现金流入量,  $OUT_{ft}$  为每小时内现金流出量,  $C_m$  为更换和维护储能电池费用; 式 (10) 中,  $C_{sh}$  为充电站内单个充电桩安装成本,  $Q_c$  为已安装充电桩数量,  $C_k$  为风电装机成本,  $Q_k$  为风机数量,  $y_k$  为二元决策变量,  $m$  为风机总类型数量,  $C_p$  为光伏板每平方米造价,  $S_p$  为光伏板安装表面积,  $C_s$  为储能系统成本,  $E_s$  为已安装储能系统标称容量.

式 (9) 中各变量表达式如下:

$$IN_{ft} = P_{EV} \cdot C_{EV} + P_{S2G} \cdot C_G \quad (11)$$

$$OUT_{ft} = P_{G2S} \cdot C_B \quad (12)$$

$$C_m = \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_s(t)}{T_s} \cdot C_s \cdot E_s + C_{mh} \quad (13)$$

式 (11)~式 (13) 中,  $P_{EV}$  为每小时向电动汽车用户提供的总充电功率,  $C_{EV}$  为单位时间收取电动汽车用户电价,  $P_{S2G}$  为每小时充电站向电网反馈的电能,  $C_G$  为电力市场每小时购买电能价格,  $P_{G2S}$  为每小时充电站从电网消耗的电能,  $C_b$  为电力市场电能每小时销售价格,  $P_s$  为每小时内储能系统释电能,  $T_s$  为电池容量生命周期,  $C_{mh}$  为  $h$  年内储能系统维护费用, 其他变量含

义与式 (8)~式 (10) 一致.

### 2.2 约束条件

(1) 充电站功率平衡

$$P_{WT} + P_{PV} + P_{G2S} + P_{s放} = P_{EV} + P_{S2G} + P_{s充} \quad (14)$$

式中,  $P_{WT}$  为式 (3) 中风机输出功率,  $P_{PV}$  为式 (5) 光伏电池输出功率,  $P_{s放}$  为储能系统单位时间放电功率,  $P_{s充}$  为储能系统单位时间充电功率, 其他变量与式 (11)~式 (13) 含义一致.

(2) 储能能量平衡

$$E_{st} = E_{st-1} + E_{st充} - E_{st放} \quad (15)$$

式中,  $E_{sh}$  为储能系统在  $t$  小时存储能量,  $E_{sh-1}$  为储能系统在  $t-1$  小时中的存储能量,  $E_{st充}$  为  $t$  小时中的充电量,  $E_{st放}$  为  $t$  小时中的放电.

(3) 风力发电机组供电功率约束

$$P_{WT} < P_{WT额} \quad (16)$$

式中,  $P_{WT}$  为风力发电机提供的发电功率,  $P_{WT额}$  为已安装风力发电机额定发电功率.

(4) 光伏板功率约束

$$P_{PV} < P_{PV额} \quad (17)$$

式中,  $P_{PV}$  为光伏发电发电功率,  $P_{PV额}$  为已安装的光伏发电机额定功率.

(5) 储能系统充放电功率和电能约束

$$P_{s充} \leq P_{s额} \quad (18)$$

$$P_{s放} \leq P_{s额} \quad (19)$$

式中,  $P_{s额}$  为所安装储能系统的额定功率, 其他两个变量与式 (14) 中含义一致.

储能系统在  $t$  小时内放电能必须等于或小于  $t-1$  小时内的储存能量; 在  $t$  小时内的充电量必须等于或小于储能系统标称容量和  $t-1$  小时内储存能量差值.

$$E_{st放} \leq E_{st-1} \quad (20)$$

$$E_{st充} \leq E_s - E_{st-1} \quad (21)$$

(6) 接入点的电网供电和消耗功率约束

$$P_{G2S} \leq P_{Gmax} \quad (22)$$

$$P_{S2G} \leq P_{Gmax} \quad (23)$$

式中,  $P_{Gmax}$  为接入点最大功率限制, 其他变量含义与式 (11)~式 (13) 含义一致.

(7) 充电站供电功率限制

$$P_{EV} \leq P_{EV\text{额}} \quad (24)$$

式中,  $P_{EV\text{额}}$  为所安装充电桩额定功率.

(8) 电动汽车的等待时间限制

$$t_{EVk} \leq t_{EV\text{max}} \quad (25)$$

式中,  $t_{EVk}$  为每辆车的等待时间,  $t_{EV\text{max}}$  为预期等待最长时间.

### 3 优化算法

针对本文动态规划配置模型, 相对于蚁群算法等遗传算法具有较快的求解速度, 本文利用遗传算法进行求解模型, 流程如图1所示.

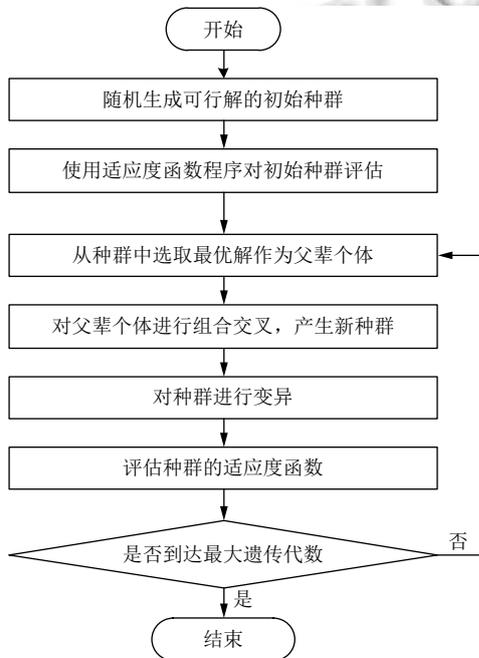


图1 遗传算法流程

#### 3.1 染色体: 优化变量

染色体代表每个个体, 这里表示与充电站的结构有关的变量, 包括充电桩的数量和功率, 风力发电机的数量和类型, 光伏板的表面积, 储能系统容量和与电网的连接传输容量. 限制条件如表1中所示.

#### 3.2 交叉和变异算子

染色体有3个整型基因和4个实型基因, 用于整型型三种基因的交叉算子创建一个随机的二元向量, 如果向量为1, 则从第一父代选择基因, 如果向量为0,

则从第二父代选择基因; 然后, 结合这些基因创造出两个子代. 如果二进制向量为 [1 0 1], 且父向量为  $parent1 = [a \ b \ c]$  和  $parent2 = [1 \ 2 \ 3]$ , 则子向量为  $child1 = [a \ 2 \ c]$  和  $child2 = [1 \ b \ 3]$ . 4个实型基因的交叉算子分别从双亲  $parent1$  和  $parent2$  中生成子女的每一个基因  $k$ , 使用的函数为:

$$child = parent1 + Ratio \times (parent2 - parent1) \quad (26)$$

式中,  $Ratio$  的值设为 0.8.

表1 优化变量范围

变量	描述	下限	上限
$Q_c$	充电桩数量	1	10
$Q_k$	风机数量	0	4
$P_{EV}$	充电桩功率(kW)	44	220
$S_p$	光伏板表面积(m <sup>2</sup> )	0	1875
$E_s$	储能标称系统容量(kWh)	0	500
$P_{G\text{max}}$	连接电网的传输容量(kW)	0	600

在突变算子中, 首先生成一个介于 0 和 1 之间的随机数, 如果这个数小于一个阈值 (在本例中为 0.001), 那么这个染色体就会发生突变; 然后 1 和 pf 基因之间的整数随机数表示应用该突变的基因; 最后对于整数型基因, 该基因被在该基因的限制范围内产生的整数随机数所改变. 对于实数型基因, 在该基因的极限之间产生一个实数随机数.

#### 3.3 适应度函数: 盈利能力

适应度函数与 NPV 在数学模型中描述的目标函数相同, 初始费用对应于安装每个能源系统元件的成本, 收入与提供给客户为其车辆充电的电能以及销售给电网的剩余电能相关. 此外, 费用包含从电网购买电能的费用, 充电站的维护费用和电池更换的费用.

使用顺序蒙特卡罗方法进行模拟. 首先, 该算法根据到达时间、电池容量和电池 SOC 来计算每小时 EV 需求; 然后, 计算风能和太阳能发电机产生的电能, 以及发电机、电池、充电桩和电网之间的电能流量, 在计算电能流量时必须考虑电能流量约束; 最后, 计算适应度函数值, 如图2所示.

销售给电网和从电网购买的电能成本是根据电力市场的每小时电能成本加上相应的电网使用费来计算的, 而出售给电动汽车的能源成本是电力市场成本加上利润.

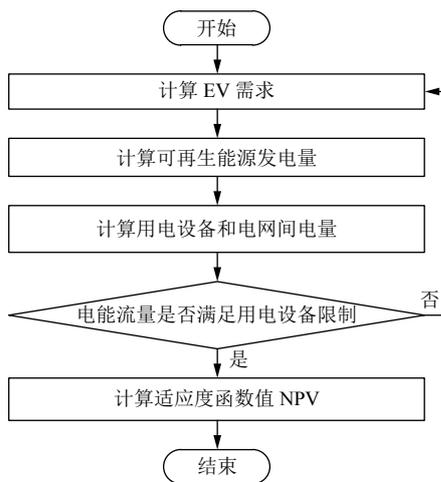


图2 适应度函数流程

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述

用于对EV需求、风电和光伏资源进行建模的数据在“输入数据模型”部分,表2为优化算法的决策变量的限制。

表2 经济成本(单位:元/kW)

安装-维修成本		交易价格	
风电机	4940-210	向电网售电	1.3
光伏板	760-37	向电网售电	0.4
充电桩	1100-51	从电网买电	1.5
储能电池	1140-38	合同价格	0.9

算例1:充电站只由电网供电。在这种方案下,充电站连接到电网,并且所需的所有能量都从电网购买。算例2:充电站只由可再生能源供电。在这种方案下,充电站与电网隔离,仅由太阳能和风能供电。算例3:充电站同时由可再生能源和电网供电。在这种方案下,充电站有可再生能源供电同时与电网进行连接。3种算例中电动汽车总充电功率满足式(14)充电站总功率平衡约束,单个电动汽车充电时间及充电功率等充电行为不受模型约束。模型仿真过程中,其他边界条件满足式(15)~式(26)约束要求。充电站各设备安装-维修成本及交易价格如表2所示。

表2中成本包含各设备安装成本及1年内维修成本,均按每kW容量设定,模型未考虑随着时间增加维修费用增加情况。

### 4.2 仿真结果分析

针对3种算例,基于表1优化约束和表2经济成

本,利用图1遗传算法迭代计算式(8)最大净现值(NPV)模型,每小时模拟一次。参考图2适应度函数流程,根据EV到达时间、电池容量等信息计算每小时充电需求以及风机和光伏出力情况,以及各设备与电网功率交互。最终每种模式优化配置情况及经济效果分析见表3和表4。

表3 每个算例配置情况

算例	1	2	3
充电桩数量	4	5	5
充电功率(kW)	44.26	44.25	46.11
风机数量	0	4	4
光伏板面积(m <sup>2</sup> )	0	1456.38	1871.95
储能容量(kWh)	0	379.57	329.51
电网功率(kW)	128.33	0	298.36
计算时间(min)	104	136	153

表4 每个算例的经济结果

算例	1	2	3
NPV(元)	1264 622	5981 405	7527 382
投资额(元)	672 843	2 676 834	2970 817
电池更换成本(元)	0	331 831	288 062
维护成本(元/年)	7600	7600	7600
从电网购买电能成本(元/年)	457 444	0	31 448
向电网出售电能收入(元/年)	0	0	114 661
向EV出售电能收入(元/年)	592 990	594 684	632 069

表3给出了每种算例下充电桩数量及每个充电桩的功率,电网和充电站之间交互最大功率,风力发电机的数量,太阳能PV板的表面积,储能容量。

表4给出了净现值(NPV)、投资额、电池更换成本、维护成本、从电网购买电能的成本、向电网出售电能的收入和向EV驾驶者出售电能的收入等。

### 4.3 算例比较分析

从表3可以看出,3种算例下充电桩数量和功率基本相同,因为它们主要取决于需求特性。在算例1中充电桩数量较少,该方案下充电站仅由电网供电,其电能价格比可再生能源更昂贵;算例3同时由电网和可再生能源供电,但算例3电网功率却比算例1多,因为算例1中充电站仅能从电网购买电能,而算例3中充电站可以向电网购买电能的同时也可以向电网出售电能;比较算例2和算例3中的可再生能源功率可以发现,算例3中的可再生能源有四个风电机和1871.95 m<sup>2</sup>的太阳能板,而算例2中仅有1456.38 m<sup>2</sup>的太阳能板,这是因为算例2中生产出多余的电能无法利用,所以仅需要

生产出满足需求的电能即可,而算例3可以向电网出售电能而获取利润,所以建设较多的可再生能源会更好。

从经济角度来看,在算例3中获得了最佳解决方案, NPV 的值高于算例2。在算例3中,充电站采用混合策略,该策略可以从向 EV 所有者和电网出售电能中获得收入。由于可再生发电机和电池的安装成本,算例2和算例3的投资额比算例1要大得多,如表4所示。

图3显示了每种算例下每个月使用的电能(出售给EV和电网)。

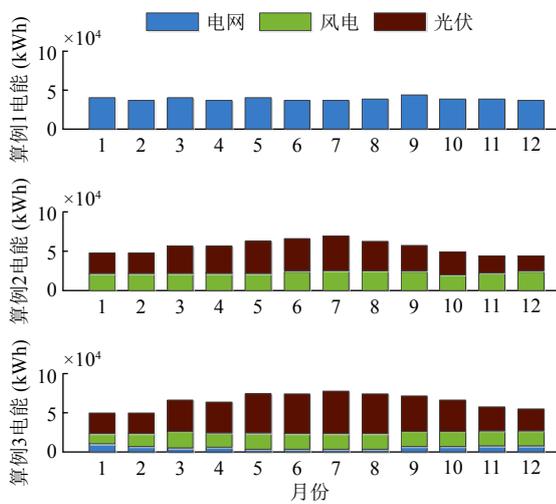


图3 每个算例每月使用的电能来源

算例1只有4个充电桩,所以当所有充电桩都被占用时,消费者则不会选择停下来充电。算例2有5个充电桩,它可以为更多的消费者服务。但在某些情况下,由于可再生能源的波动或浪费了过多的能源,可能会出现能源短缺。算例3有5个充电桩,但优化配置要求安装更多的太阳能可再生能源,因为剩余能源可以出售给电网。

图4以年度等效值比较了3个算例。算例1的总成本很高,因为运营成本很高。算例3的收入最高,因为它可以向电网出售电能,因此利润最高。

在算例1中,销售给EV的所有电能都是电网提供的。在算例2中,所有电能都来自风能和太阳能,但需要电池为EV间接提供充电服务,并且在当天凌晨5点左右,充电站无法提供所需求的电能。在算例3中,当可再生能源不足时,充电站使用电网为电动汽车提供电能。

在3个算例模拟迭代计算过程中,充电站每天运行情况根据站内分布式电源设备出力及电动汽车充电需求不同而不同,图5给出一年内某典型一天该充电站功率需求曲线。

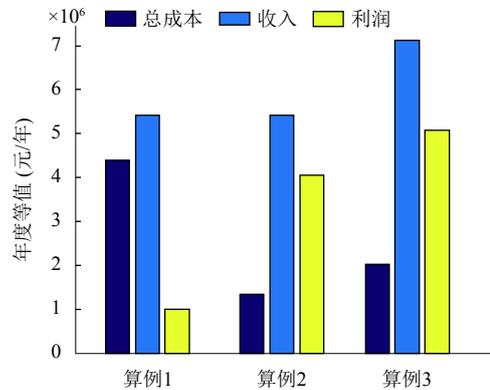
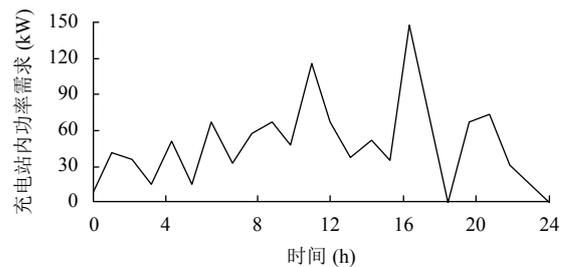
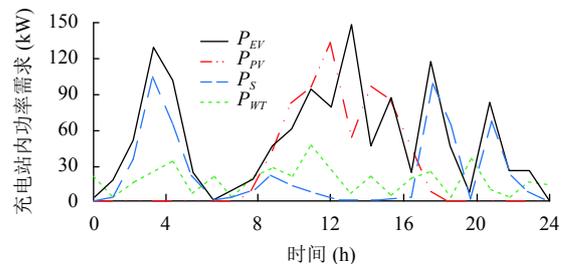


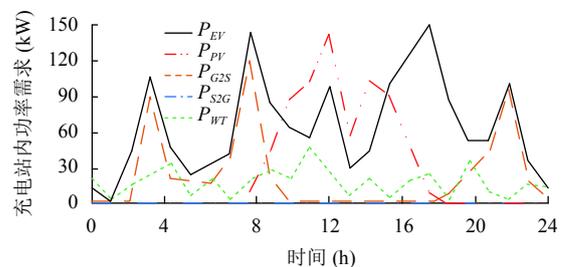
图4 年度等效值的比较



(a) 算例1充电功率需求曲线



(b) 算例2站内功率需求曲线



(c) 算例3站内功率需求曲线

图5 3种模式下充电站内优化配置结果

图5(a)中,算例1仅由电网给电动汽车供电,给出站内充电桩总充电功率曲线,该曲线为每小时模拟过

程中所有充电桩给电动汽车充电的累加功率。图 5(b) 为算例 2 情况下充电站内各设备与充电桩功率交换情况, 所有电能均来自风电和光伏, 且在发电低谷期由储能系统提供充电服务。在算例 3 中, 如图 5(c) 所示, 当风电和光伏发电不足时, 充电站使用电网为电动汽车提供电能, 由于储能系统充放电存在损耗, 该算例中储能系统未参与互动, 另外, 由于风电和光伏出力不存在过剩情况, 向电网送电功率为 0, 即  $P_{S2G}$  曲线与横坐标重合。

## 5 结论

本文从技术和经济因素层面优化了电动汽车快速充电站的设计模型, 采用遗传算法结合蒙特卡洛模拟进行求解分析, 更加逼真地模拟了电动汽车需求和更新生成, 得到了更加全面的需求模型。并通过算例比较得出电动汽车快速充电站的最佳设计模式, 可以通过使用可再生能源发电来提高盈利能力, 同时需要与电网连接以保证充电站的工作稳定性。本研究对建设电动汽车充电站、促进新能源发电, 以及实现更可持续的能源管理有着重要意义。

### 参考文献

- 1 杨军, 林洋佳, 陈杰军, 等. 未来城市共享电动汽车发展模式. 电力建设, 2019, 40(4): 49–59. [doi: 10.3969/j.issn.1000-7229.2019.04.007]
- 2 吕金炳, 韦鹏飞, 刘亚丽, 等. 考虑新能源出力相关性的电网电压暂降随机预估. 电力建设, 2018, 39(10): 71–81. [doi: 10.3969/j.issn.1000-7229.2018.10.009]
- 3 杨敏霞, 解大, 张宇, 等. 电动汽车充放储一体化电站与电网运行状态的相关模式分析. 电力与能源, 2013, 34(6): 562–567. [doi: 10.3969/j.issn.2095-1256.2013.06.003]
- 4 Hafez O, Bhattacharya K. Optimal design of electric vehicle charging stations considering various energy resources. Renewable Energy, 2017, 107: 576–589. [doi: 10.1016/j.renene.2017.01.066]
- 5 Latifi M, Rastegarnia A, Khalili A, et al. Agent-based decentralized optimal charging strategy for plug-in electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3668–3680. [doi: 10.1109/TIE.2018.2853609]
- 6 Fazelpour F, Vafaiepour M, Rahbari O, et al. Intelligent optimization to integrate a plug-in hybrid electric vehicle smart parking lot with renewable energy resources and enhance grid characteristics. Energy Conversion and Management, 2014, 77: 250–261. [doi: 10.1016/j.enconman.2013.09.006]
- 7 Sadeghi-Barzani P, Rajabi-Ghahnavieh A, Kazemi-Karegar H. Optimal fast charging station placing and sizing. Applied Energy, 2014, 125: 289–299. [doi: 10.1016/j.apenergy.2014.03.077]
- 8 Fathabadi H. Novel wind powered electric vehicle charging station with vehicle-to-grid (V2G) connection capability. Energy Conversion and Management, 2017, 136: 229–239. [doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.045]
- 9 周逢权, 连湛伟, 王晓雷, 等. 电动汽车充电站运营模式探析. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 63–66, 71. [doi: 10.7667/j.issn.1674-3415.2010.21.013]
- 10 王浩然, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的电动汽车充电站充电权交易: 机制、模型和方法. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 425–435.