

基于有序充电策略的换电站及分布式电源 多场景协调规划方法

田园园, 廖清芬, 徐雨田, 陈懿
(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 通过引入电动汽车换电站的有序充电策略, 以系统建设运行成本、综合净负荷波动指标以及网络能量损耗最小为目标, 提出统筹考虑电动汽车换电站和分布式电源的多场景协调规划方法, 并给出满足电动汽车换电需求约束和备用电池存在性约束的备用电池调度方案和最少备用电池计算方法。结合风光电源出力的季节特性, 针对 IEEE 33 节点系统, 利用生物地理优化算法进行多场景规划仿真分析, 验证了所提规划方法可利用换电站有序充电策略平抑配电网综合净负荷波动, 起到了削峰填谷的作用, 大幅降低了网络能量损耗, 显著提高了风光电源的可规划容量; 同时所采用的最少备用电池计算方法, 可充分考虑换电站内备用电池在一天中的循环利用, 在维持有序充电策略周转的前提下能有效缓解电池储备压力, 大幅降低了换电站投资成本。

关键词: 电动汽车; 换电站; 分布式电源; 多场景规划; 备用电池; 有序充电

中图分类号: TM 761; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.009

0 引言

随着世界范围内生态环境质量的不断下降, 人们越来越提倡绿色环保的生活方式, 同时在国家政策的大力支持下, 有利于减少温室气体排放、降低对化石燃料依赖的电动汽车得到了迅速的发展^[1-3]。电动汽车不仅是一种城市交通服务工具, 还作为新型用电负荷与配电网发生直接功率交换。因此, 相关充换电基础设施的规划建设不仅要考虑电动汽车用户的出行需求和便利程度, 还要兼顾配电系统的网络结构、负荷特性和分布式电源(DG)出力等, 尽量降低充电负荷对配电系统运行稳定性与经济性的负面影响^[4]。

目前, 已有学者针对电动汽车充电站与大量分布式电源的联合规划展开研究。文献[5]考虑了风光资源和负荷的随机波动性, 以配电系统投资、运行维护成本以及环境成本的随机期望值最小为目标, 建立了含分布式电源与充电站的配电网协调规划模型。文献[6]考虑分布式电源同时为配电网负荷和充电站供电, 建立了总成本最小、网络损耗最小和交通满意度最高的电动汽车充电站与分布式电源定容选址模型。但受限于电动汽车插充模式下充电站所接纳充电负荷的分散性, 上述规划未能引入考虑有序充电策略的运行规划协调优化。

相比于电动汽车插充模式, 换电模式可以通过电池租赁方式实现电动汽车与动力电池的资产关系解耦、时间解耦和地点解耦^[7], 其统一调度下的有序充放电策略具有方便快捷、便于管理、利于配电网运行

优化的优点, 与其相对应的电动汽车换电站接入配电网的规划也得到了了一定的研究^[8-10]。文献[8]基于换电站的全寿命周期成本和换电收益, 以净现值最大化为目标, 采用改进差分进化算法, 确定了换电站的最优充放电策略及相应的选址定容方案。文献[9]采用与换电站布局有相似数学特点的 Voronoi 图划分换电站服务区域, 依据服务区内换电需求确定换电站规模, 基于改进粒子群优化算法提出了最优规划的联合求解流程。同时, 考虑到电动汽车电池造价昂贵, 换电站内备用电池冗余度太高会导致经济性下降, 冗余度太低又将无法充分满足换电需求, 因此换电站内的备用电池规划问题也亟待解决。文献[11]结合集中充电、统一配送模式, 在远期规划阶段简单估算来年所需储备的电池组数量, 近期规划阶段结合日换电需求和物流配送原则获得最终购买电池组数量。文献[12]给出了换电充裕度的概念并建立了相应的数学模型, 通过蒙特卡洛法得到了各时段满足换电需求的备用电池数目。但上述文献局限于对电动汽车换电站的独立规划, 未能充分体现换电模式下灵活可控的充电策略与大量分布式电源相互配合、协调优化的优越性。电动汽车换电站作为社会公共服务设施的同时, 也在配电网中担任着负荷和储能的双重角色。统一充电模式为换电站的充电策略赋予了高度可调度性, 若能合理安排换电站内备用电池的充放电过程, 有效整合充电负荷与传统负荷、分布式电源间的运行关系, 通过削峰填谷充分实现资源的优化配置, 便能有效抑制分布式电源波动、降低网络损耗, 从而显著提高系统对分布式电源的接纳能力, 并大幅降低系统建设运行成本。因此, 有必要将换电站与分布式电源统筹考虑、协调规划。本文引入了电动汽车换电站的有序充电策略, 通过对充

收稿日期: 2016-09-01; 修回日期: 2017-06-27

基金项目: 国家电网公司总部科技研究项目(5211011400BT)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(5211011400BT)

电负荷时间和数量上的控制来平抑多场景风光电源出力波动,并基于备用电池调度方案给出了最少备用电池计算方法,从而以系统建设运行成本、综合净负荷波动指标和网络能量损耗最小为原则,提出了基于有序充电策略的换电站及分布式电源多场景协调规划方法,并针对 IEEE 33 节点测试系统进行了多场景仿真分析,验证了所提规划方法的有效性。

1 换电站运营模式分析

1.1 换电需求分析

在换电模式下,电动汽车与电池的时空解耦大幅增强了换电站充放电策略的可调度性,使其免受用户实时充电需求的限制,只需满足各时段用户对电池的更换需求即可。

家用电动汽车的日行驶距离可用极大似然估计法近似为对数正态分布^[13],如式(1)所示。

$$f_D(x) = \frac{1}{x\sigma_D\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] \quad (1)$$

其中, $f_D(x)$ 为日行驶距离的概率密度函数; σ_D 和 μ_D 为对数正态分布的参数。

结合式(1),采用蒙特卡洛法^[14]可得电动汽车日行驶距离 S_i ,则规划区域内日换电需求总量 C_N 为:

$$C_N = \sum_{i=1}^{N_s} \left\lceil \frac{S_i \cdot W_{100}}{100 \cdot (1-\lambda) W_n} \right\rceil \quad (2)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数; λ 表征电动汽车用户对电池剩余电量的心理承受能力,即当剩余电量百分比降至 λ 时,用户将选择更换电池; W_{100} 为电动汽车百公里耗电量; W_n 为电池额定容量; N_s 为规划区域内电动汽车总量。

日换电需求总量在各时段的分布情况受电动汽车车主日常出行规律和换电习惯的影响。假设忽略电动汽车在换电过程中的行驶距离,则车辆 i 从任一时刻 t_1 至换电时刻 t_2 的行驶里程 S_{di} 如式(3)所示。

$$S_{di} = \begin{cases} \frac{W_{i1} - \lambda W_n}{W_{100}/100} & W_{i1} - \lambda W_n \geq 0 \\ 0 & W_{i1} - \lambda W_n < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, W_{i1} 为时刻 t_1 的剩余电量。

同时,根据电动汽车用户出行规律的统计数据,还可将 S_{di} 表示为:

$$S_{di} = \begin{cases} S_i \left[\frac{t_{1\max} - t_1}{T} \cdot f_s(\bar{t}_1) + \sum_{t=\bar{t}_1+1}^{\bar{t}_2-1} f_s(t) + \frac{t_2 - t_{2\min}}{T} \cdot f_s(\bar{t}_2) \right] & 0 \leq \bar{t}_1 \leq \bar{t}_2 \leq 24 \\ S_i \left[\frac{t_{1\max} - t_1}{T} \cdot f_s(\bar{t}_1) + \sum_{t=\bar{t}_1+1}^{24} f_s(t) + \sum_{t=1}^{\bar{t}_2-1} f_s(t) + \frac{t_2 - t_{2\min}}{T} \cdot f_s(\bar{t}_2) \right] & 0 \leq \bar{t}_2 \leq \bar{t}_1 \leq 24 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $t_{1\max}$ 为时刻 t_1 之后的第一个整点时刻; $t_{2\max}$ 为时刻 t_2 之前的第一个整点时刻; T 为单位时段的时

长; \bar{t}_1 和 \bar{t}_2 分别为时刻 t_1 和时刻 t_2 所处时段的编号; $f_s(t)$ 为电动汽车在 t 时段内的行驶里程百分比。

将式(3)和式(4)联立,得到基于随机变量日行驶距离的换电时刻分析模型^[15],采用蒙特卡洛法模拟电动汽车的换电时刻 t_2 ,并统计换电时刻位于区间 $[t-1, t)$ 的概率,再结合规划区域内的日换电需求总量计算 t 时段的换电需求数 $C(t)$,即为各时段换电站至少需要储备的满电电池数量。

1.2 备用电池数量分析

为充分满足电动汽车用户各时段的换电需求,换电系统内除电动汽车携带的车载电池外,还需在换电站内储备足够的备用电池。电动汽车电池造价昂贵,备用电池成本甚至占据换电站投资成本的主要部分。因此,为减轻换电站的电池储备压力,有必要结合最优电池调度方案计算所需的最少备用电池数。

在备用电池数量分析中,假设 t 时段内所需的电动汽车换电操作均在末尾时刻瞬间进行, t 时段内的电池充放电功率平均分布于整个时段,且调度原则为:充电时段内,电池电量越足则充电优先权越大,以便尽快得到更多满电电池;而放电时段内,电池电量越少则放电优先权越大,以便保留更多满电电池。若 t 时段内进行充电和放电的电池个数分别为 $a(t)$ 和 $b(t)$,假设将剩余电量百分比为 λ 的电池充至满电或将满电电池放电至电量百分比为 λ 所需小时数均为 n ,则 t 时段末尾时刻的所有备用电池可根据电量情况划分为 $n+1$ 类,其电量分别为 $[\lambda + j/n \cdot (1-\lambda)] \times W_n$ ($j \in [0, n]$),各类电池的数目 $x_j(t)$ ($j \in [0, n]$)如下。

当 $0 \leq a(t) \leq x_{n-1}(t-1)$ 时,有:

$$x_{n-j}(t) = \begin{cases} x_{n-j}(t-1) + a(t) - C(t) & j=0 \\ x_{n-j}(t-1) - a(t) & j=1 \\ x_{n-j}(t-1) & \forall j \in [2, n-1] \\ x_{n-j}(t-1) + C(t) & j=n \end{cases} \quad (5)$$

当 $\sum_{i=1}^{m-1} x_{n-i}(t-1) \leq a(t) \leq \sum_{i=1}^m x_{n-i}(t-1)$ ($\forall m \in [2, n]$)时,有:

$$x_{n-j}(t) = \begin{cases} x_{n-j}(t-1) + x_{n-(j+1)}(t-1) - C(t) & j=0 \\ x_{n-(j+1)}(t-1) & \forall j \in [1, m-2], m>2 \\ a(t) - \sum_{i=1}^{m-1} x_{n-i}(t-1) & j=m-1 \\ x_{n-j}(t-1) - \left[a(t) - \sum_{i=1}^{m-1} x_{n-i}(t-1) \right] & j=m \\ x_{n-j}(t-1) & \forall j \in [m+1, n-1] \\ x_{n-j}(t-1) + C(t) & j=n \end{cases} \quad (6)$$

当 $0 \leq b(t) \leq x_1(t-1)$ 时,有:

$$x_j(t) = \begin{cases} x_j(t-1) + b(t) + C(t) & j=0 \\ x_j(t-1) - b(t) & j=1 \\ x_j(t-1) & \forall j \in [2, n-1] \\ x_j(t-1) - C(t) & j=n \end{cases} \quad (7)$$

当 $\sum_{i=1}^{m-1} x_i(t-1) \leq b(t) \leq \sum_{i=1}^m x_i(t-1) (\forall m \in [2, n])$

时,有:

$$x_j(t) = \begin{cases} x_j(t-1) + x_{j+1}(t-1) + C(t) & j=0 \\ x_{j+1}(t-1) & \forall j \in [1, m-2], m > 2 \\ b(t) - \sum_{i=1}^{m-1} x_i(t-1) & j=m-1 \\ x_j(t-1) - \left[b(t) - \sum_{i=1}^{m-1} x_i(t-1) \right] & j=m \\ x_j(t-1) & \forall j \in [m+1, n-1] \\ x_j(t-1) - C(t) & j=n \end{cases} \quad (8)$$

式(5)、(6)表明,在充电时段内,各类电池有可能向电量更大的紧邻类型的电池转化,且原本电量越大的电池数量变动的概率越大。式(7)、(8)表明,在放电时段内,各类电池有可能向电量更小的紧邻类型的电池转化,且原本电量越小的电池数量变动的概率越大。同时,在上述换电操作的假设下,换电站将在 t 时段的末尾时刻收入 $C(t)$ 个电量为 λW_n 的电池,并同时为电动汽车换上 $C(t)$ 个满电电池。

综合式(5)—(8)还可以得到:

$$\sum_{j=0}^n x_j(t) = \sum_{j=0}^n x_j(t-1) \quad (9)$$

上式表明,在各类电池的相互转化下,所有类型电池的总和不随时间变化,且将与初始零时刻的电池总数相等。满足换电约束条件的最小电池总数即为换电站所需配备的备用电池数目。

2 基于有序充电策略的换电站及分布式电源协调规划模型

2.1 目标函数

分布式风光电源具有典型的间歇性和随机性^[16],其不确定性出力将加大传统配电网的负荷波动,迫切需要其他能源系统进行实时补偿。电动汽车的充放电功能使其具有成为储能电源的潜质,同时电动汽车换电站在电动汽车与动力电池间实现了资产关系解耦,使得配电网掌握动力电池主动权成为可能,从而能在统一管理的框架下进行电池充放电的优化运行,以缓冲系统负荷与分布式电源的波动,从而提高分布式电源的接纳能力。分布式电源出力可被视为负值负荷,将其与换电站的充电负荷以及配电网传统负荷叠加,即得到系统综合净负荷。为了更好地实现换电站削峰填谷的作用,可将综合净负荷波动最小^[17]作为目标之一来优化换电站有序充电策略,同时兼顾分布式电源建设成本、换电站建设成本、网络损耗成本等传统经济性因素来制定换电站与分布式电源协调规划的综合目标函数见式(10)—(17)。

$$\min F = F_{\text{inv}} + F_{\text{bat}} + F_{\text{loss}} - F_{\text{less}} + F_{\text{fluc}} \quad (10)$$

$$F_{\text{inv}} = a_w f_w \sum_i W_i^w w_i + a_s f_s \sum_i W_i^s s_i + a_{\text{sta}} f_{\text{sta}} W_{\text{sta}} \quad (11)$$

其中, F_{inv} 为分布式电源和换电站的建设投资成本; a_w 、 a_s 和 a_{sta} 分别为风电、光伏和换电站的投资年化系数; f_w 、 f_s 和 f_{sta} 分别为风电、光伏和换电站的单位容量建设费用; W_i^w 和 W_i^s 分别为节点 i 处安装风电和光伏的容量; w_i 和 s_i 分别表示节点 i 处是否安装风电和光伏的二值变量; W_{sta} 为换电站的规划容量。

$$F_{\text{bat}} = a_{\text{bat}} f_{\text{bat}} \sum_{j=0}^n x_j(0) \quad (12)$$

其中, F_{bat} 为备用电池购买成本; a_{bat} 和 f_{bat} 分别为备用电池的投资年化系数和单价; $x_j(0)$ 为初始零时刻所需的第 j 类电池的个数。

$$F_{\text{loss}} = T_{\text{days}} \cdot \sum_{k=1}^{24} \int_k I_k^2(t) R_k p_e(t) \quad (13)$$

其中, F_{loss} 为网络损耗成本; T_{days} 为一年的天数; $I_k(t)$ 为第 k 条线路于 t 时段的电流; R_k 为第 k 条线路的电阻; $p_e(t)$ 为 t 时段的电价。

$$F_{\text{less}} = T_{\text{days}} \cdot \sum_{i=1}^{24} \sum_i (P_i^w(t) + P_i^s(t)) \cdot T \cdot p_e(t) \quad (14)$$

其中, F_{less} 为建设分布式电源后减少的系统购电成本; $P_i^w(t)$ 和 $P_i^s(t)$ 分别为节点 i 于 t 时段的风电出力 and 光伏出力。

$$P_{\text{ev}}(t) = a(t) \cdot P_{\text{cha}} \cdot \eta_{\text{cha}} - b(t) \cdot P_{\text{dis}} / \eta_{\text{dis}} \quad (15)$$

$$P_e(t) = P_1(t) - \sum_i (P_i^w(t) + P_i^s(t)) + P_{\text{ev}}(t) \quad (16)$$

$$F_{\text{fluc}} = T_{\text{days}} \cdot \sum_{t=1}^{24} \left(P_e(t) - \frac{\sum_{t=1}^{24} P_e(t)}{24} \right)^2 \cdot \varepsilon_{\text{fluc}} \quad (17)$$

其中, $P_{\text{ev}}(t)$ 为 t 时段内换电站的充电功率; P_{cha} 和 P_{dis} 分别为电池的充电功率和放电功率; η_{cha} 和 η_{dis} 分别为电池的充电效率和放电效率; $P_e(t)$ 为 t 时段内系统的综合净负荷; $P_1(t)$ 为系统于 t 时段的原始电负荷; F_{fluc} 和 $\varepsilon_{\text{fluc}}$ 分别为针对综合净负荷波动的惩罚成本和惩罚系数。

2.2 约束条件

在基于有序充电策略的换电站及分布式电源协调规划中,应同时考虑来自换电站及配电网的多重约束,具体如式(18)—(25)所示。

a. 电动汽车换电总需求约束:

$$\sum_{t=1}^{24} (a(t) - b(t)) / n = C_N \quad (18)$$

上式表明一天内完成的净充电电池个数需满足规划区域内的日换电需求总量 C_N 。

b. 换电站备用电池存在性约束:

$$x_j(t) \geq 0 \quad \forall j \in [0, n], \forall t \in [1, 24] \quad (19)$$

上式确保了各时段各类型电池物理意义上的存在性。结合式(5)—(8)可知,上式中对各时段满电电池数 $x_n(t)$ 的约束可保证各时段的 $C(t)$ 均得到满足。

c. 换电站备用电池周期性约束:

$$x_j(0) = x_j(24) \quad \forall j \in [0, n] \quad (20)$$

本文中换电站采用的调度策略所对应的运行时长为一天 24 h,为了确保换电站运行过程的连续性,现假设初始 00:00 的各类电池数目与末端 24:00 的各类电池数目分别相等,否则在式(9)所示的电池总和不不变特性的影响下,将必然出现在新的初始时刻部分类型电池数目短缺的情况,导致换电站需要不断补充新的备用电池,引起不必要的投资成本增加。

d. 换电站充放电策略约束:

$$a(t) \cdot b(t) = 0 \quad \forall t \in [1, 24] \quad (21)$$

上式表明,任一时段内换电站的充电操作和放电操作不能同时存在。

e. 换电站容量约束:

$$W_{sta} \geq \max \{a(t) \cdot P_{cha} \cdot \eta_{cha}, t \in [1, 24]\} \quad (22)$$

f. 功率平衡约束:

$$P_m(t) \cdot \lambda_i + P_i^w(t) + P_i^s(t) - P_{ev}(t)\mu_i - P_i^l(t) = U_i(t) \cdot \sum_{h \in \Omega_N, h \neq i} U_h(t) (G_{ih} \cos \theta_{ih} + B_{ih} \sin \theta_{ih}) \quad \forall i \in \Omega_N, t \in [1, 24] \quad (23)$$

其中, $P_m(t)$ 为 t 时段内由上级电网注入系统的有功功率; λ_i 和 μ_i 分别表示上级电网和换电站是否与节点 i 相连的二值变量; $P_i^l(t)$ 为 t 时段内节点 i 的有功负荷; $U_i(t)$ 和 $U_h(t)$ 分别为 t 时段内节点 i 和节点 h 的电压幅值; G_{ih} 、 B_{ih} 、 θ_{ih} 分别为节点 i 与 h 间的电导、电纳和电压相角差; Ω_N 为节点集合。

g. 节点电压约束:

$$U_{min} \leq U_i(t) \leq U_{max} \quad \forall i \in \Omega_N, t \in [1, 24] \quad (24)$$

其中, U_{max} 和 U_{min} 分别为系统节点电压的上限和下限。

h. 功率倒送约束:

$$P_m(t) \geq 0 \quad \forall t \in [1, 24] \quad (25)$$

为了避免分布式电源容量过大时对系统安全稳定产生影响,现假设配电网不得向主网倒送功率。

3 规划模型的多场景设置及求解方法

3.1 分布式电源的季节性场景削减

在换电站与分布式电源的协调规划过程中,须充分考虑风电和光伏出力显著的波动性。但若利用全部历史数据进行仿真计算,或进行大量长周期的随机生成模拟,都将由于运算量巨大而导致求解困难。因此,本文按照不同季节将风电与光伏出力的全年历史数据划分为春、夏、秋、冬 4 个日场景样本集,并分别利用同步回代消除法进行日场景削减,步骤如下。

首先在各季节样本集中根据式(26)辨识并删除与各场景距离最近的场景 s^* ,并减少场景总数 N 。

$$\pi_s \pi_{s^*} \min_{s \neq s^*} d_{ss^*} = \min_{m \in [1, N]} \pi_m \left\{ \min_{n \in [1, N], n \neq m} \pi_n d_{nm} \right\} \quad (26)$$

其中, π_s 为场景 s 的概率; d_{xy} 表示场景 x 与场景 y 的距离,可用二范数表示。

接着辨识与场景 s^* 距离最近的场景 s^{**} ,并把场

景 s^* 的概率累加到场景 s^{**} 上,如式(27)所示。

$$\pi_{s^{**}} = \pi_{s^{**}} + \pi_{s^*} \quad (27)$$

重复上述步骤直至剩余场景数达到约束条件,即可得到经过场景削减的各季节风光出力日场景,从而在减少计算量的同时计及分布式电源出力的随机性、时序性和季节性。

3.2 基于生物地理学优化算法的多场景规划模型求解

生物地理学优化(BBO)算法^[18]是一种基于自然界种群迁移机制的进化算法,自 2008 年首次提出后便以其独特的搜索机制和良好的收敛性能而迅速在智能算法领域得到了广泛的关注。其基本思想是以生物栖息地个体对应优化问题的可能解,根据栖息地适宜度指数(HSI)来进行物种迁徙和物种变异,改善栖息地的物种多样性,从而得到与 HSI 最优的栖息地个体相对应的最优解。

针对基于有序充电策略的换电站及分布式电源协调规划问题,利用 BBO 算法进行多场景优化模型求解的流程如图 1 所示。

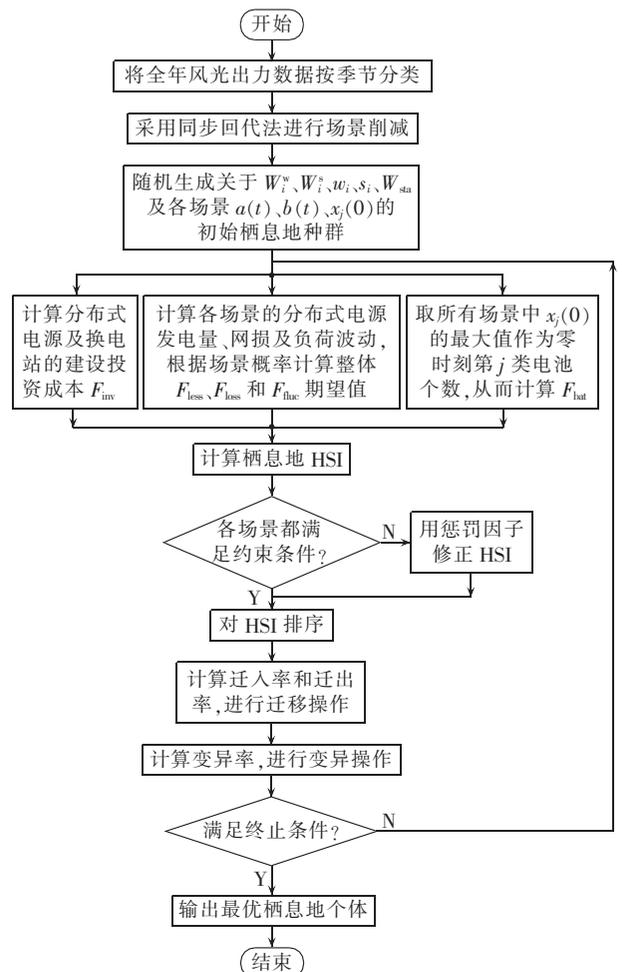


图 1 基于 BBO 算法的多场景规划流程图
Fig.1 Flowchart of multi-scenario planning based on BBO algorithm

4 算例分析

4.1 参数设置

为了验证本文所提规划方法的有效性,本文以 IEEE 33 节点系统^[19]为例进行规划分析,其系统结构图如图 2 所示,系统总负荷为 $3715 + j2300 \text{ kV}\cdot\text{A}$,系统额定电压为 12.66 kV,节点电压允许范围为 0.93~1.07 p.u.。本文选择节点 8、14、24 和 32 作为风电的候选站址,节点 7、14、18 和 25 作为光伏的候选站址。

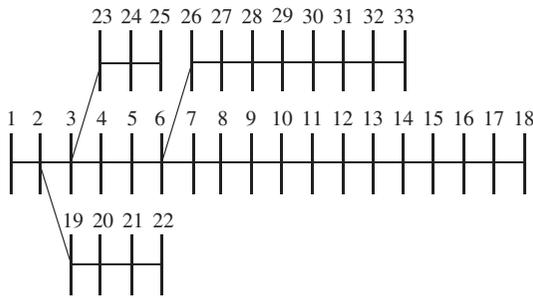


图 2 IEEE 33 节点系统结构图

Fig.2 Structure of IEEE 33-bus system

某地区全年风光出力曲线进行季节性场景削减后的各场景风光出力日波动曲线及负荷曲线如图 3 所示,图中功率为标么值,各场景概率均为 0.25。

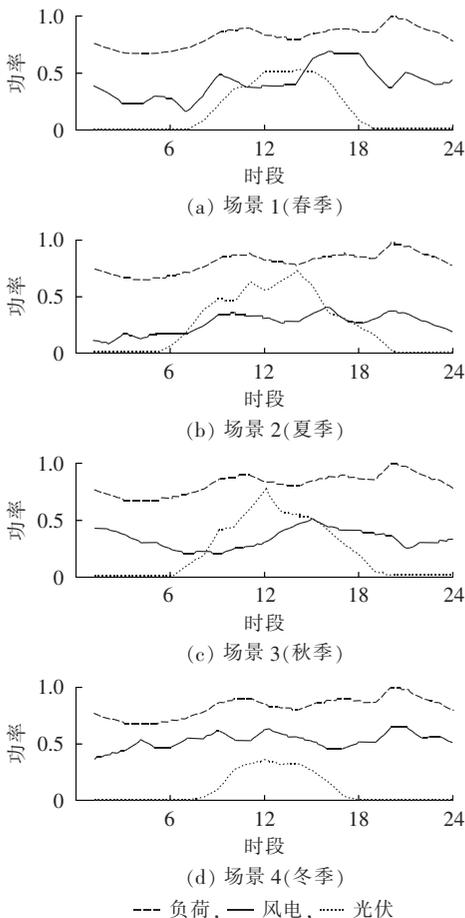


图 3 多场景风光出力曲线及负荷曲线

Fig.3 Wind and photovoltaic power and load for multi-scenarios

电动汽车换电站设置于节点 6,单个电池容量为 16.5 kW,剩余电量最小承受值为 20%,电池充电功率为 4.89 kW,电池放电功率为 3.96 kW,充放电效率均为 90%,则单个电池的充放电过程需 3 h。假设该系统共有 1100 辆家用电动汽车,百千米耗电量为 $15 \text{ kW}\cdot\text{h}$,日行驶里程的对数正态分布参数为: $\sigma_D = 0.88, \mu_D = 3.2$ 。每小时行驶里程百分数见表 1^[20],则一天的换电总需求约为 500 个,各时段换电需求分布见图 4。

表 1 电动汽车每小时行驶里程百分比
Table 1 Mileage percentage per hour of EV

时段	百分比/%	时段	百分比/%	时段	百分比/%
1	0.44	9	7.69	17	8.78
2	0.21	10	5.61	18	9.05
3	0.11	11	6.45	19	5.28
4	0.07	12	6.57	20	4.41
5	0.19	13	6.51	21	2.78
6	0.81	14	6.91	22	2.06
7	2.54	15	6.98	23	1.95
8	6.13	16	7.21	24	1.26

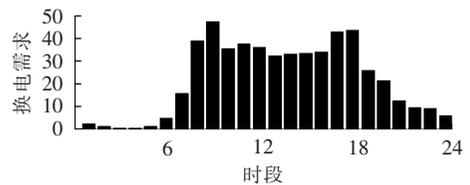


图 4 各时段换电需求分布图

Fig.4 Distribution of battery-swapping demand for each period

假设配电网以分时电价从上级电网购电,谷时段(时段 1—8)电价为 0.4 元/(kW·h),峰时段(时段 9—11、15—22)电价为 0.8 元/(kW·h),平时段(时段 12—14、23—24)电价为 0.6 元/(kW·h);负荷波动惩罚系数为 1 元/MW²;风电和光伏的投资成本为 1000 万元/MW;换电站的建设成本为 9000 元/kW;备用电池购置成本为 4.29 万元/个;换电站和分布式电源的运行年限为 20 a,备用电池的运行年限为 10 a,资金折现率为 0.08。

4.2 结果分析

在 MATLAB 平台上利用 BBO 算法对上述算例进行规划分析,得到结果如下。图 5 为只计及配电网原始负荷和风光出力的多场景初始净负荷曲线,因系统安装分布式电源容量较大,且风光电源有波动性,因此图 5 的多场景下系统净负荷波动较为显著。

以计及充电负荷后的系统综合净负荷波动最小为原则,所得多场景换电站有序充电策略见图 6。可见,各场景换电站的充电功率波动趋势与图 5 的初始净负荷波动趋势相反,即有序充电策略可根据各场景的风光出力特性调整充电功率,在原始电负荷较小且分布式电源出力较大时从系统充电,在原始电负荷较大且分布式电源出力较小时向系统放电。

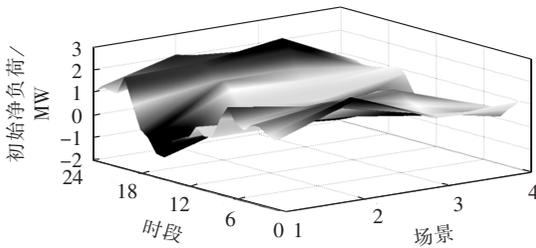


图 5 未考虑充电负荷的多场景初始净负荷曲线
Fig.5 Initial net load for multi-scenarios without considering charging load

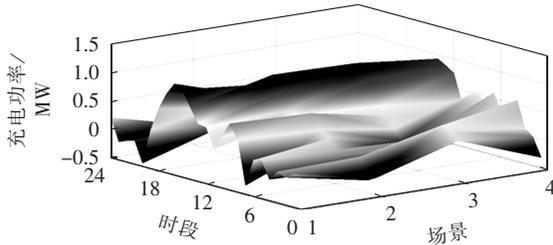


图 6 多场景换电站有序充电策略
Fig.6 Coordinated charging strategy of BSS for multi-scenarios

在上述有序充电策略的作用下,考虑充电负荷后的各场景综合净负荷波动见图 7。与图 5 所示的初始净负荷相比,综合净负荷波动性明显减小,且综合净负荷可始终维持非负。可见,上述有序充电策略具有显著的削峰填谷的作用,且能保证在不向上级电网倒送功率的前提下容纳相应容量的分布式电源。

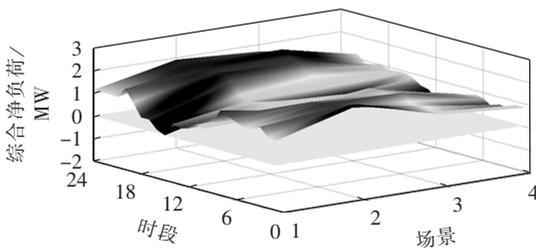


图 7 考虑充电负荷后的多场景综合净负荷波动
Fig.7 Comprehensive net load fluctuation of multi-scenarios after considering charging load

选取换电站内的空电池和满电电池作为所有类型电池的代表进行分析,其各场景下各时段的数目分别见图 8 和图 9,可见,空电池数和满电电池数始终满足备用电池存在性约束,且大多数时段有充足盈余。

由于图 6 所示的各场景充电功率从时段 12 开始大幅增加,因此为了提供大规模充电功率,换电站内所有电池都陆续进入充电状态,导致空电池数目

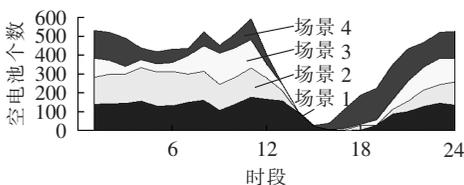


图 8 各场景下的空电池数目变化曲线
Fig.8 Number of battery without power for each scenario

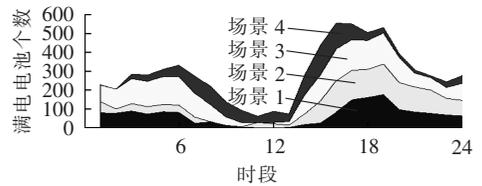


图 9 各场景下的满电电池数目变化曲线
Fig.9 Number of battery with full power for each scenario

急剧下降,时段 16 附近降至低谷,由于换电需求从时段 17 开始进一步增大,收回的电池使得空电池数目略有提高。随后充电功率逐步降低,转而进入放电状态,空电池数目得以逐步回升。

由于换电需求从时段 7 开始大幅增加并维持于较高水平,因此夜间储备的满电电池迅速减少。等到时段 11 附近配电网原始负荷迎来小峰值,且此时分布式电源出力不够显著,在系统综合净负荷波动最小原则的影响下,此时换电站充电功率的增长速度没有完全跟上换电需求,故满电电池数目于时段 11 附近降至低谷。随后充电功率显著增加,满电电池数目得以逐步回升。晚间负荷高峰期时,充电功率逐渐下降并转而进入放电状态,使满电电池数目有所回落。

为体现上述基于有序充电策略的换电站与分布式电源协调规划方法的有效性,将其规划结果与考虑充电站的分布式电源规划结果进行对比,并假设充电站与换电站容量相等,且以分时电价下充电成本最小为原则来优化充电站的充电策略,对比情况见表 2。

为节省换电站的电池投资成本,本文充分考虑了电池在一天内的循环利用,同时在兼顾换电站有序充电策略的基础上合理安排各场景下的备用电池运行规律,并以电池存在性和电池周期性为约束条件,得到多场景下换电站所需最小备用电池个数为 284 个,只占随车电池总数的 25.8%。可见,本文的电池调度策略可在充分维持换电站有序充电策略周转的前提下有效缓解电池储备压力,大幅降低换电站投资成本。

随着分布式电源接入规模的不断增加,其随机性及波动性的影响越来越大。因电力市场的分时电价一般是根据原始电负荷的峰谷时段制定,而非基于考虑分布式电源出力后的净负荷波动制定,故当电动汽车以分时电价下的充电费用最小为原则前往充电站充电时,往往趋向于在原始负荷高峰期向电网放电,在原始负荷低谷期充电,此时分时电价的引导并不能起到真正的削峰填谷的作用,在分布式电源的影响下系统净负荷波动往往仍较大,净负荷谷值较低,因此考虑充电站与分布式电源的协调规划时,在功率倒送约束下,分布式电源的规划总容量只有 4.4 MW。而换电模式下,换电站的充放电策略具有可调度性,其充电负荷能实时缓冲分布式电源的波动性和随机性,综合净负荷趋于平缓,其多场景下的平均负荷波

表 2 分别考虑换电站及充电站情况下的配电网规划结果

Table 2 Planning results of distribution network respectively considering BSS and charging station

情况	安装位置(数量)		场景	$x_0(0)$	$x_1(0)$	$x_2(0)$	$x_3(0)$	$F_{loss}/$ 万元	$F_{less}/$ 万元	$F_{lbc}/$ 万元	$F_{inv}/$ 万元	$F_{ba}/$ 万元	$F/$ 万元	建设运行成本 减少量/万元
	风电(0.1 MW)	光伏(0.1 MW)												
考虑 换 电 站	节点 8(14), 节 点 14(8), 节点 24(10), 节点 32 (14)	节点 7(11), 节 点 14(0), 节点 18(4), 节点 25 (9)	1	134	14	32	62	37.83	1380.80	178.23				
			2	122	18	10	82	39.91	1083.90	158.74				
			3	126	18	2	90	38.73	1159.80	147.69	814.18	305.20	14.02	424.1
			4	142	2	34	40	33.60	1478.70	46.99				
			多场景	142	18	34	90	37.52	1275.80	132.92				
考虑 充 电 站	节点 8(11), 节 点 14(9), 节点 24(0), 节点 32 (13)	节点 7(0), 节点 14(0), 节 点 18(5), 节点 25(6)	1					44.43	927.04	786.31				
			2					48.32	684.30	615.28				
			3					44.66	751.47	417.65	549.24		275.06	253.7
			4					39.33	1025.70	295.67				
			多场景					44.19	847.13	528.76				

动费用相比充电模式下下降了 74.9%, 因此其所受功率倒送约束的影响较小, 配电网可接纳的分布式电源容量大幅增加, 分布式电源的规划总容量为 7 MW, 相比充电模式下分布式电源的规划容量增加了 59%。

换电模式下规划的分布式电源容量较大, 故其 F_{inv} 较高, 而分布式电源出力的增加使其减少的 F_{less} 也较高。分布式电源出力还使得从上级系统获取电能的需求下降, 从而减小了电力线路传输量, 使 F_{loss} 相比充电模式下下降了 15.1%。因此, 换电模式下综合考虑 F_{inv} 、 F_{less} 、 F_{loss} 的建设运行成本减少量为 424.1 万元, 相比充电模式提高了 67.2%, 同时考虑到清洁能源的环境效益、换电站的租赁电池收益以及线路容量下降对配网升级的延缓作用, 可见本文的换电站及分布式电源协调规划具有显著的经济效益。

5 结论

本文以系统建设运行成本、综合净负荷波动指标以及网络能量损耗最小为目标, 提出了基于有序充电策略的换电站及分布式电源多场景协调规划方法。

a. 该方法在满足电动汽车用户换电需求约束及备用电池约束的前提下, 分别确定了各场景下换电站的有序充电策略及备用电池调度方案。

b. 该方法基于有序充电策略建立的换电站与分布式电源多场景协调规划模型, 充分考虑了分布式电源的随机性与波动性, 利用换电站充电功率与多场景分布式电源出力的协调配合, 可以有效平抑配电网综合净负荷波动, 起到削峰填谷的作用, 大幅降低网络能量损耗, 显著提高风光电源的可规划容量。

c. 该方法基于备用电池调度方案提出的最少备用电池计算方法, 充分考虑了换电站内备用电池在一天中的循环利用, 可在充分维持有序充电策略周转的同时有效缓解电池储备压力, 大幅降低换电站投资成本, 为配电网中换电站的规划建设提供一定指导。

参考文献:

[1] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电

力自动化设备, 2015, 35(6):1-9.

GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6):1-9.

[2] 朱学贵, 覃阳, 苏向丰, 等. 电动汽车充电机对电能计量的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6):52-57.

ZHU Xuegui, QIN Yang, SU Xiangfeng, et al. Impact of electric vehicle charger on electric energy metering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6):52-57.

[3] 赵胜霞, 刘俊勇, 向月, 等. 考虑配电网接纳能力的电动汽车充换电服务网基础设施配置方案分析与评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6):94-101.

ZHAO Shengxia, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Analysis and assessment considering accommodation capability of distribution network for infrastructure deployment of EV charging/swapping service network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):94-101.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 刘柏良, 黄学良, 李军, 等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术, 2015, 39(2):450-456.

LIU Boliang, HUANG Xueliang, LI Jun, et al. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2015, 39(2):450-456.

[7] 薛飞, 雷宪章, 张野飏, 等. 电动汽车与智能电网从 V2G 到 B2G 的全新结合模式[J]. 电网技术, 2012, 36(2):29-34.

XUE Fei, LEI Xianzhang, ZHANG Yebiao, et al. A brand-new approach of connecting electrical vehicles with smart grid from vehicle-to-grid mode to battery-to-grid mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(2):29-34.

[8] ZHENG Y, DONG Z Y, XU Y, et al. Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):221-229.

[9] 熊虎, 向铁元, 荣欣, 等. 电动汽车电池更换站布局的最优规划

- [J]. 电力自动化设备,2012,32(9):1-6.
- XIONG Hu, XIANG Tiejuan, RONG Xin, et al. Optimal allocation of electric vehicle battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9):1-6.
- [10] WANG C, YANG J, LIU N, et al. Study on siting and sizing of battery-switch station[C]//2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai, China; IEEE, 2011:657-662.
- [11] 高赐威, 吴茜, 薛飞, 等. 换电模式下电动汽车电池组需求规划[J]. 电网技术, 2013, 37(7):1783-1791.
- GAO Ciwei, WU Xi, XUE Fei, et al. Demand planning of electric vehicle battery pack under battery swapping mode[J]. Power System Technology, 2013, 37(7):1783-1791.
- [12] 张昌华, 孟劲松, 曹永兴, 等. 换电模式下电动汽车换电充裕度模型及仿真研究[J]. 电网技术, 2012, 36(9):15-19.
- ZHANG Changhua, MENG Jinsong, CAO Yongxing, et al. A battery swapping requirement adequacy model for electric vehicles and its simulation research[J]. Power System Technology, 2012, 36(9):15-19.
- [13] 白浩, 苗世洪, 钱甜甜, 等. 联合发电系统用于含电动汽车的配电网可靠性评估研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11):127-137.
- BAI Hao, MIAO Shihong, QIAN Tiantian, et al. Reliability assessment based on combined power generation system for distribution system with electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11):127-137.
- [14] YU L, ZHAO T, CHEN Q, et al. Centralized bi-level spatial-temporal coordination charging strategy for area electric vehicles[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4):74-83.
- [15] 高赐威, 吴茜, 潘樟惠. 考虑电动汽车换电站储能功能的经济调度模型研究[C/CD]//中国电工技术学会学术年会. 武汉, 中国: 2015.
- GAO Ciwei, WU Xi, PAN Zhanghui. Analysis of the economic dispatch model considering the energy storage function of the battery swapping station[C/CD]//China Electrotechnical Society Academic Annual Conference. Wuhan, China; 2015.
- [16] 王守相, 韩亮. DG出力不确定性对配电网影响力分析的复仿射数学方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31):5507-5515.
- WANG Shouxiang, HAN Liang. Complex affine arithmetic based method for the analyses of DG's uncertainty influence on distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31):5507-5515.
- [17] 曹一家, 刘易珠, 阙凌燕, 等. 换电站与电网协调的多目标双层实时充放电调度方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4):1-7.
- CAO Yijia, LIU Yizhu, QUE Lingyan, et al. Multi-objective bi-level real-time charging/discharging dispatch with coordination of BSS and grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4):1-7.
- [18] 董飞飞, 刘涤尘, 吴军, 等. 基于改进BBO优化算法和电网生存性的核心骨干网架构建[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16):2659-2667.
- DONG Feifei, LIU Dichen, WU Jun, et al. A method of constructing core backbone grid based on improved BBO optimization algorithm and survivability of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2659-2667.
- [19] 王世丹. 含分布式电源的配电系统无功优化技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- WANG Shidan. Research on the reactive power optimization of distributed network including distributed generation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [20] 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.

作者简介:



田园园

田园园(1992—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研究方向为配电系统规划与运行(E-mail:jenny524@qq.com);

廖清芬(1975—),女,浙江衢州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:qfliao@whu.edu.cn)。

Multi-scenario coordinated planning method of EV battery-swapping station and distributed generation based on coordinated charging strategy

TIAN Yuanyuan, LIAO Qingfen, XU Yutian, CHEN Yi

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A multi-scenario coordinated planning method of EV (Electric Vehicle) BSS (Battery-Swapping Station) and distributed generation is proposed by introducing the coordinated charging strategy of EV BSS, which takes the minimum construction and operation cost, fluctuation index of comprehensive load and network energy loss as its objective. A spare battery scheduling scheme and a calculation method of minimum amount of battery are also introduced, which satisfies the constraints of battery-swapping demand and reserve battery existence. According to the seasonality characteristics of wind power output and photovoltaic output, the biogeography-based optimization method is adopted for the multi-scenario planning simulation on IEEE 33-bus system, which verifies that the proposed method can smooth the fluctuation of comprehensive net load of distribution network by the coordinated charging strategy of EV BSS, achieving peak load shifting, significantly reducing the energy loss of network, and greatly improving the planning capacity of wind and photovoltaic power. Meanwhile, the proposed calculation method for minimum reserve battery can make full use of the daily battery recycling in the BSS and effectively relieve the stress of battery reserve on the premise of maintaining the coordinated charging, significantly reducing the investment cost of BSS.

Key words: electric vehicles; battery-swapping station; distributed power generation; multi-scenario planning; spare battery; coordinated charging