

考虑削峰填谷的配电网集中型充电站选址定容规划

所丽, 唐巍, 白牧可, 张璐

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京市 海淀区 100083)

Locating and Sizing of Centralized Charging Stations in Distribution Network Considering Load Shifting

SUO Li, TANG Wei, BAI Muke, ZHANG Lu

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Haidian District, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Leasing batteries and establishing centralized charging stations are the future competitive development orientations in electric vehicle industry. Based on driving distance probability distribution of various electric vehicles obtained by statistical analysis, an uncertainty model of electric vehicle battery replacement demand is established. Considering the investment of centralized charging stations and lines, network loss and load shifting, a planning model for centralized charging stations is put forward. The hybrid intelligent optimization method, which combines the improved genetic algorithm with the self-adaptive particle swarm algorithm, is used to solve the above two layer programming models. The service area is divided by the weighted Voronoi diagram in order to balance the load rates of centralized charging stations. The simulation results show that the proposed model and method are effective and feasible for centralized charging station planning.

KEY WORDS: centralized charging station planning; electric vehicle battery replacement demand; load shifting; improved genetic algorithm; self-adaptive particle swarm optimization; bi-level programming model

摘要: 采用电池租赁和建立集中型充电站是电动汽车产业具有竞争力的发展模式。根据规划区各类型电动汽车日行驶距离概率分布,建立了电动汽车日换电需求模型。以此为基础,将集中型充电站的规划与配电网调度相结合,建立了考虑削峰填谷作用的集中型充电站选址定容二层规划模型。利用改进遗传算法与自适应粒子群相结合的混合智能算法进行求解,并将加权伏罗诺伊图应用于集中型充电站服务区域的划分,实现了集中型充电站负载率的均衡。通过仿真算例验证了所提模型和方法的有效性和可行性。

关键词: 集中型充电站规划; 电动汽车换电需求; 削峰填谷; 改进遗传算法; 自适应粒子群优化; 二层规划

0 引言

近 10 年来,电动汽车已在欧美、日本等发达国家初步形成规模^[1],随着动力电池的发展,电动汽车以其高效、节能、低噪声、零排放的优势,在未来市场中将得到快速发展和广泛应用^[2-3]。中国电动汽车科技发展“十二五”专项规划中确立了以纯电动技术为主导的思路^[4],2010 年国网公司提出了我国电动汽车以“换电为主,充插为辅”的发展模式。电池租赁可以降低用户的购车费用、提高电池利用率、延长电池寿命;集中型充电站便于管理、能降低随机充电给电网带来的波动^[5],电池租赁和建立集中型充电站已成为当前具有竞争力的发展趋势。

国内外在电动汽车对电网的影响、充电功率预测和电网优化调度方面做了很多的研究。文献[6-8]从负荷曲线、电压、损耗、三相不平衡和谐波等方面研究了电动汽车接入对电网的影响。文献[9]验证了无序充电模式下电动汽车充电将导致电网负荷出现“峰上加峰”的情况。文献[10]表明电动汽车有序充电对电网负荷有削峰填谷的作用。文献[11-12]利用蒙特卡洛法建立了电动汽车功率需求的统计模型,计算充电负荷曲线时假定荷电状态与充电开始时间有关且服从一定概率分布,但这种假设受充电方式的影响,并不能从电动汽车本身的特点出发客观的反映其功率需求,在集中型充电站规划中并不适用。文献[13-14]基于分层分区的思想建立了充放电调度模型。文献[15-17]以电价作为调控手段建立了市场环境下的充放电策略。文献[18-20]考虑可再生能源出力的不确定性,建立了结合电动汽车的可再生能源出力的随机优化调度

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377162)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377162).

模型。由于电动汽车具有随机性、分散性和不确定性的特点，导致基于 V2G 背景下的研究问题复杂、实现困难，而文献[21]提出的 B2G 模式成功克服了电池管理困难、对电网冲击大的缺点，为电动汽车的发展提供了新思路，在 B2G 背景下集中型充电站是实现“换电为主，充插为辅”的重要组成部分。

目前，国内外对于充电站规划方面已有一些研究成果，但研究主要以 V2G 为背景，以接入 10kV 配网的充电站为主，对于 B2G 背景下接入 110kV 集中型充电站的研究还处于初级阶段，尚未形成完整、系统的模型和方法。文献[22]在分析电动汽车充电行为的基础上，以服务系统总费用为目标函数，基于排队论理论建立了充电设施优化的模型。文献[23]以充电和充电站投资成本为目标函数，基于动态交通网络思想建立了充电站位置和容量的多目标优化模型。文献[24]以充电站总成本和网损费用之和为目标函数，将地理因素和服务半径作为约束条件，构造了充电站最优规划的数学模型。文献[25]以年运行最大收益为目标建立充电站规划的模型，利用伏罗诺伊图对充电站的规划区域进行划分。文献[26]以包含充电站的配电网投资和运行成本为目标函数，建立了考虑充电站布局优化的配电网规划模型。以上研究均以充电站接入 10kV 配电网的情况为主，且将充电站只作为负荷考虑，没有考虑充电站向电网提供能量的情况。文献[5]建立了使 110kV 集中型充电站和线路建设费用最小的规划模型，但在考虑集中型充电站选址定容的同时没有考虑其与电网的优化调度问题，没有发挥集中型充电站作为储能元件的作用。

在 B2G 背景下，电动汽车与电池的解耦使得电动汽车的功率需求不直接影响集中型充电站的规划和调度，而根据电动汽车日行驶距离概率分布得到的换电需求对集中型充电站的规划和运行具有决定性作用，本文在研究各类型电动汽车日行驶距离概率分布的基础上，得到规划区电动汽车的换电需求，考虑集中型充电站对电网削峰填谷的作用，提出了既满足用户需求、城市路网规划，又满足电网规划和优化调度的集中型充电站的二层规划模型。

1 电动汽车换电需求分析

1.1 各类电动汽车日行驶距离概率分布

目前，国内外对于电动汽车的研究大部分是基

于 V2G 的背景，所以在研究电动汽车充电需求时受电动汽车的充电方式、空间和时间分布不确定性的影响，而 B2G 背景下更换电池模式将电动汽车与电池分离，使得集中型充电站的规划与现有 V2G 背景下充电站的规划存在很大差异，所以现有的电动汽车充电功率需求，并不适用于集中型充电站的规划。文献[27]虽然提出了符合集中型充电站容量优化的电动汽车电池组数量需求模型，但此模型在考虑各类型车辆换电需求时将各类型车辆的行驶距离作为确定值来计算，不能真实反映车辆换电需求的不确定性，本文考虑市场规模、日行驶里程不确定性，获得电动汽车换电需求模型。

根据用途不同对燃油汽车进行分类，分别对各类燃油汽车的出行时间、运行规律进行调研，得出各类燃油汽车的日行驶里程符合正态分布或对数正态分布。由于电动汽车与燃油汽车除能源供给不同外没有大的差异，所以通过燃油汽车统计得到的规律可以应用于电动汽车分析中。根据国家及各省市的电动汽车发展规划和目前各类车辆的市场规模，本文主要研究电动公交车、电动出租车、电动私家车的换电需求。根据统计分析可知，电动公交车和出租车日行驶距离满足正态分布，如公式(1)所示，电动私家车日行驶距离满足对数正态分布，如公式(2)所示：

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

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

规划区不同，各类电动汽车日行驶距离概率分布函数的参数有所不同。图 1、2、3 分别给出私家车^[28]、公交车和出租车日行驶里程概率分布情况。

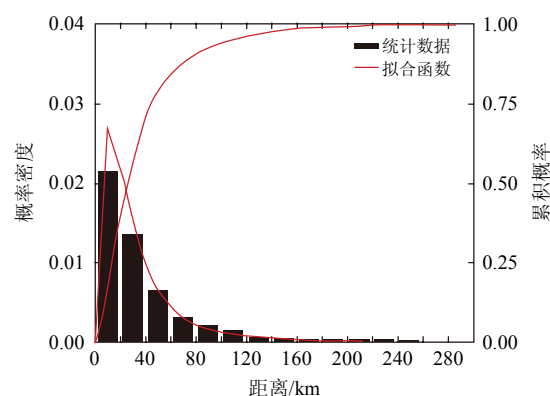


图 1 私家车日行驶距离概率分布

Fig. 1 Probability distribution of private vehicle driving distance in one day

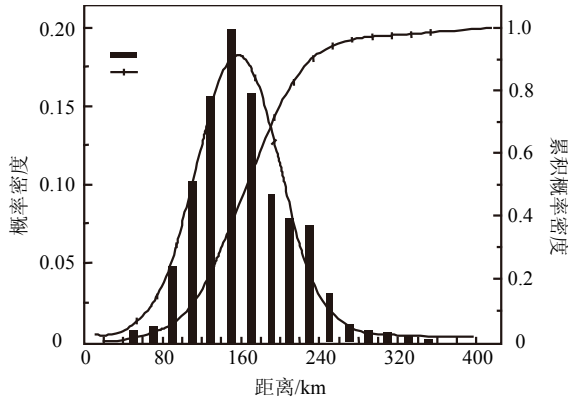


图2 公交车日行驶距离概率分布

Fig. 2 Probability distribution of bus driving distance in one day

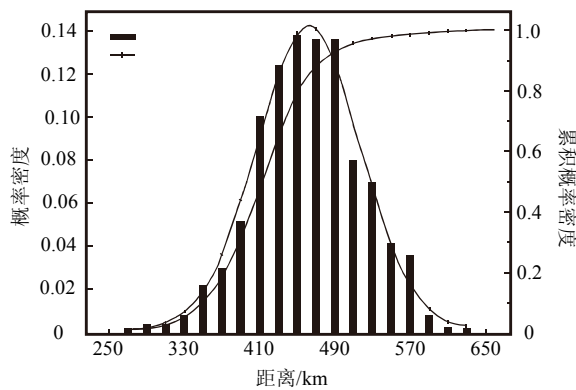


图3 出租车日行驶距离概率分布

Fig. 3 Probability distribution of taxi driving distance in one day

1.2 规划区电动汽车换电需求预测

假设集中型充电站每天只配送一次^[27],则规划区的电动汽车换电需求计算以天为单位。根据规划区所在规划水平年的各类电动汽车的数量、各类型电动汽车日行驶里程概率密度函数和目前电动汽车百 km 电耗水平,计算各类型车辆日换电池需求,将各种类型的电动汽车换电需求进行叠加得到规划区总换电需求。计算步骤如下:

1) 根据第 n 种类型车辆的日行驶距离概率密度函数,随机抽取 N_d^n 辆第 n 种类型电动汽车的日行驶距离 $\psi_n(i), i=1,2,\dots,N_d^n$;

2) 计算第 n 种类型中第 i 辆电动汽车的日功率需求,公式如下:

$$P_{ni} = W_{100} \psi_n(i), \quad t=1,2,\dots,24 \quad (3)$$

式中: P_{ni} 表示第 n 种类型中第 i 辆电动汽车日功率需求; W_{100} 表示电动汽车百 km 电耗。

3) 计算第 n 种类型中第 i 辆电动汽车一天的换电需求和第 n 种类型电动汽车总换电需求,公式如下:

$$L_{ni} = \lceil P_{ni} / S \rceil \quad (4)$$

$$L_n = \sum_{i=1}^{N_d^n} L_{ni} \quad (5)$$

式中: L_{ni} 表示第 n 种类型中第 i 辆电动汽车一天需换电池块数; $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整; L_n 表示第 n 种类型电动汽车一天总的换电池块数; S 表示单块电池的容量。

4) 计算规划区内电动汽车一天的换电需求,公式如下:

$$L = \sum_{n=1}^N L_n \quad (6)$$

式中: L 为规划区域电动汽车总的换电需求; n 为电动汽车类型,本文中 $n=1,2,3$ 分别表示电动公交车、电动出租车、电动私家车; L_n 为第 n 类电动汽车的换电需求。

2 集中型充电站选址定容二层规划模型

2.1 二层规划模型

集中型充电站作为公共服务设施和配电系统的重要组成部分,在建设时要充分考虑经济性、电动汽车用户以及配电网的要求,特别是在智能电网中,具有负载和储能元素的双重角色,要充分发挥削峰填谷,减少电网损耗等作用。本文的目标函数为集中型充电站、线路的建设运行费用和网损费用最小。建设运行费用受电网、城市路网、地价和网损等因素的影响;而在集中型充电站的位置、容量和新建线路确定的情况下,网损与配电网的调度有关。考虑模型的复杂性,本文建立了集中型充电站选址定容的二层规划模型。

$$\begin{cases} \min F = F(x, y) \\ \text{s.t. } G(x) \leq 0 \\ \min \bar{v} = f(x, y) \\ \text{s.t. } g(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $F(\cdot)$ 为上层的目标函数,为集中型充电站、线路建设运行费用和网损; $G(\cdot)$ 为上层约束函数; $f(\cdot)$ 为下层的目标函数,为等效负荷方差和; \bar{v} 为下层目标值; $g(\cdot)$ 为下层约束函数; x 为上层决策向量,为集中型充电站的位置、容量和新建线路; y 为下层决策向量,为集中型充电站各时段的调度值。

在式(7)中,上层决策作用于下层目标和约束函数,下层以最优值反映到上层,实现上下层的相互作用。

2.2 上层规划模型

假设各集中型充电站的充电设备类型相同,新

建输电线路型号相同。集中型充电站规划的上层模型如下：

$$\min Z = C_{\text{charge}} + C_{\text{line}} + C_{\text{loss}} \quad (8)$$

$$C_{\text{charge}} = \sum_{i=1}^{N_C} \delta_i N_i [(C_{\text{FC}} + S_C C_{\text{FP}}^i) \frac{(1+r_0)^{n_{\text{year}}}}{(1+r_0)^{n_{\text{year}}} - 1} + C_{\text{MC}}] \quad (9)$$

$$C_{\text{line}} = \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{N_B} \delta_i \varepsilon_{ij} L_{ij} C_{\text{FL}} [\alpha + \frac{(1+r_0)^{n_{\text{year}}}}{(1+r_0)^{n_{\text{year}}} - 1}] \quad (10)$$

$$C_{\text{loss}} = C_p T_1 \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{t=1}^{N_t} p_{\text{loss}}^t \quad (11)$$

式中： C_{charge} 为充电站的建设运行费用； C_{line} 为连接集中型充电站与变电站的 110 kV 线路建设运行费用； C_{loss} 为网络损耗费用； N_C 为待建设集中型充电站的候选位置数量； δ_i 为第 i 个充电站是否建设的二元决策变量，取值为 1 时表示该待选站址将建设集中型充电站，反之则不建设； N_i 为第 i 个集中型充电站的设备套数，每套设备中包括变压器、与变压器配套的大型充电设备、配电设备和充电监控设备； C_{FC} 为单套设备的固定成本； S_C 为单套设备的占地面积； C_{FP}^i 为第 i 个站址的单位地价； C_{MC} 为单套设备的运行费用； r_0 为贴现率； N_B 为变电站的个数； ε_{ij} 为集中型充电站 i 与变电站 j 之间是否建设线路的二元决策变量，取值为 1 时表示建设该线路，反之不建设； C_{FL} 为单位双回线路建设的固定成本； α 为双回线路运行成本占固定成本的比例； C_p 为单位网损成本； p_{loss}^t 为第 i 条馈线在 t 时段的有功功率损耗； N_t 为线路馈线总数； T_1 为 1 年的天数。

集中型充电站规划的上层模型优化过程中需要满足用户和电网的要求。

1) 区域电动汽车换电需求约束

$$T_2 \sum_{i=1}^{N_C} \delta_i N_i \beta P \Delta t \geq LS \quad (12)$$

式中： P 为单套设备的额定充电功率； T_2 为换电周期，取 24h； β 为反应设备安全可靠运行的系数； Δt 为时间间隔。

2) 集中型充电站设备套数约束：

$$0 \leq N_i \leq N_{\text{max}} \quad (13)$$

式中： N_{max} 为集中型充电站设备套数的最大值。

2.3 下层规划模型

集中型充电站运行的网损费用与电网的调度有关。在电网负荷高峰时刻安排集中型充电站放电；在电网负荷低谷时段为电池充电，根据电网的负荷曲线合理对集中型充电站的充放电进行调度。

为了将电网每个时段的调度值直接反映到网络损耗计算的模型中，下层模型以电网每小时的调度值为优化变量，以电网的等效负荷方差和最小为目标函数，进而求得网损最小值。

$$\min D = \sum_{t=1}^{24} (P_L^t + P_E^t - P_{\text{av}})^2 \quad (14)$$

式中： D 为电网等效负荷方差和； P_L^t 为电网在 t 时段除集中型充电站外的典型日负荷值； P_E^t 为集中型充电站在 t 时段的功率， $P_E^t > 0$ 表示集中型充电站从电网吸收功率， $P_E^t < 0$ 表示集中型充电站向电网返送功率； P_{av} 为除集中型充电站负荷外的电网典型日负荷平均值。

在集中型充电站优化调度时，要满足集中型充电站的功率约束、容量约束和潮流约束。

1) 集中型充电站功率约束：

$$-\sum_{i=1}^{N_C} \beta N_i P \leq P_E^t \leq \sum_{i=1}^{N_C} \beta N_i P \quad (15)$$

2) 集中型充电站中电池电量约束：

$$S^{t+1} = \begin{cases} S^t + P_E^t \eta_C \Delta t, & P_E^t \geq 0 \\ S^t + P_E^t \Delta t / \eta_F, & P_E^t < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中： S^t 为集中型充电站在 t 时段所有电池总的荷电状态； Δt 为时间间隔； η_C 、 η_F 分别为充电机的充、放电效率。

集中型充电站中电池作为储能元件，为了减少电池的损耗、延长电池的寿命，要求每块电池储存的电量不能超过它的上下限，文中上限取 80%、下限取 20%，集中型充电站中所有电池的荷电状态约束为

$$80\%LS(1+\rho) \geq S^t \geq 20\%LS(1+\rho) \quad (17)$$

式中： L 为规划区电动汽车总的换电需求； ρ 为电池的备用率。

3) 集中型充电站换电需求约束：

$$\sum_{t=1}^{24} P_E^t \Delta t = LS \quad (18)$$

4) 多时段潮流约束：

$$\begin{cases} P_{Gi}^t = P_{Li}^t + U_i^t \sum_{j=1}^{N_{\text{node}}} U_j^t (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{Gi}^t = Q_{Li}^t + U_i^t \sum_{j=1}^{N_{\text{node}}} U_j^t (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i^t \leq U_i^{\max} \quad (20)$$

$$P_{Li}^{\min} \leq |P_L^t| \leq P_{Li}^{\max} \quad (21)$$

式中: P_{Gi}^t 、 Q_{Gi}^t 分别为节点处电源在时段 t 的有功、无功出力; P_L^t 、 Q_L^t 分别为节点处 t 时刻有功、无功负荷; U_i^t 为节点在时段 t 的电压大小; N_{node} 为网络节点数。

3 集中型充电站规划模型混合智能求解方法

3.1 总体求解思路

上层以集中型充电站建设运行总费用为目标函数, 已知量有规划水平年的电动汽车数量、城市路网、各待选站址情况和电力网络相关参数, 待优化变量为集中型充电站建设位置、容量和新建线路, 算法采用改进遗传算法。

将上层优化得到的集中型充电站容量和位置、各类电动汽车比例和电力网络参数作为已知量输入到加权伏罗诺伊图中, 优化各集中型充电站的服务区域。

下层以等效负荷方差和为目标函数, 已知量有上层优化得到的集中型充电站建设位置和容量、新建线路、服务区域的电动汽车功率需求, 待优化变量为集中型充电站 24h 的调度值, 算法采用自适应粒子群算法, 从而计算出网损最小值。

上下层之间通过网络损耗值相互调节, 但在第一次迭代时, 上层模型还未做出决策, 不能确定集中型充电站接入后网络的损耗值, 所以在初始迭代时给定网损为未接入集中型充电站的原网络损耗值。

3.2 求解上层模型的改进遗传算法

上层采用改进遗传算法。虽然遗传算法为解决许多传统的优化方法难以解决的优化问题提供了新的途径, 但是遗传算法在计算过程中存在各代产生的较好结果可能在遗传过程中丢失和交叉概率、变异概率参数选择不当而发生早熟的问题, 因此本文将最优保留策略和自适应遗传算法^[29]引入到规划中来, 使改进的遗传算法能够获得全局最优解。

1) 染色体编码。染色体分为 A、B 两部分, 均采用二进制编码, 如表 1 所示。

染色体第一部分长度为 $3N_C$, 每 3 位表示 1 个

表 1 染色体结构

Tab. 1 Chromosome structure

(A)集中型充电站容量	(B)新建线路
-------------	---------

候选位置上集中型充电站建设的套数, 每个位置相应 8 种可能容量, 当编码为 0 时表示不建设充电站; 染色体第二部分长度为 $3N_C$, 每 3 位二进制数表示 1 个候选位置集中型充电站接入的变电站(即确定新建线路), 每个集中型充电站有 5 个候选接入位置, 当编码为 0、6、7 时超出候选位置, 重新编码。

2) 遗传操作。针对遗传算法在运算过程中存在的问题, 本文采用具有最优保留策略、自适应交叉率、变异率和最优个体最少保留代数与最大遗传代数相结合的终止进化准则的改进遗传算法。

3.3 加权伏罗诺伊图集中型充电站服务区域划分

伏罗诺伊图是计算几何的重要分支, 在电力系统的变电站选址优化中得到了广泛的应用^[30], 在充电站的规划中也开始得到应用。设 $P=\{P_1, P_2, \dots, P_n\} \in R^2 (2 < n < \infty)$ 为二维欧式空间上互异的 n 个点构成的集合, $d(p, P_i)$ 表示空间内任一点 p 与 P_i 的欧氏距离。加权伏罗诺伊图定义为

$$V(P_i) = \{p \in R^2 \mid \omega_i d(p, P_i) \leq \omega_j d(p, P_j)\} \quad (22)$$

式中: $j=1, 2, \dots, n$ 且 $j \neq i$; ω_i 为 p_i 的权重, 当 $\omega_i=1 (i=1, 2, \dots, n)$ 时为常规伏罗诺伊图。

伏罗诺伊图权重的引入可以反映集中型充电站容量和服务区域的关系。根据各集中型充电站的负载率大小, 动态调整权重, 使集中型充电站的服务范围划分更加合理。具体步骤如下:

步骤 1: 以集中型充电站为顶点构造常规伏罗诺伊图, 计算各分区的负荷 W_{0i} , 根据各集中型充电站的额定容量 S_i , 确定初始权重 $\omega_{0i} = \sqrt{W_{0i} / S_i}$ 。

步骤 2: 根据各集中型充电站的权重构造加权伏罗诺伊图, 确定各集中型充电站的服务范围, 并计算各区域的负荷 W_i^t , 并计算各集中型充电站的负载率 $\gamma_i^t = W_i^t / S_i$ 。

步骤 3: 根据负载率自适应调节权重, 其原则如表 2 所示。表中 a 和 b 分别为集中型充电站负载率的上限值和下限值, Δ 为自适应调整量, ω_i^t 为第 i 个集中型充电站第 t 次迭代后的权重。

表 2 权重调节原则

Tab. 2 Adjustment principle of weight

γ_i^t	$>a$	$<b$	$>b$ 且 $<(a+b)/2$	$<a$ 且 $>(a+b)/2$
ω_i^{t+1}	$\omega_i^t + \Delta$	$\omega_i^t - \Delta$	$\omega_i^t - \Delta/2$	$\omega_i^t + \Delta/2$

步骤 4: 跳转到步骤 2, 根据 ω_i^{t+1} 重新构造加权伏罗诺伊图, 直至充电站负载率满足要求。

3.4 求解下层模型的自适应粒子群算法

由于下层优化变量维数高、非线性，采用具有参数设置少、搜索速度快的粒子群算法^[31]比较合适。为了避免粒子在算法后期易在全局最优解附近出现振荡的现象，本文采用使惯性因子随适应值自动改变的自适应粒子群算法^[32]。粒子的编码为

$$P_i = \overbrace{[P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{i24}]}^{\text{集中型充电站24h调度值}} \quad (23)$$

式中： P_i 为第 i 个粒子的位置； P_{it} 为第 i 个粒子 t 时刻的坐标，表示集中型充电站 t 时段的调度值。

考虑集中型充电站削峰填谷目的的一致性，在计算最优调度策略时，将集中型充电站作为一个储能元件考虑，将计算得到的最优调度值按集中型充电站的容量占建设总容量的比例进行划分，从而计算配电网的网损。

集中型充电站的调度策略：

$$P_{Ei} = \frac{N_i}{N_c} P_E$$

(24)

式中： P_{Ei} 表示第 i 个集中型充电站的调度向量； P_E 为下层优化得到的最优调度向量。

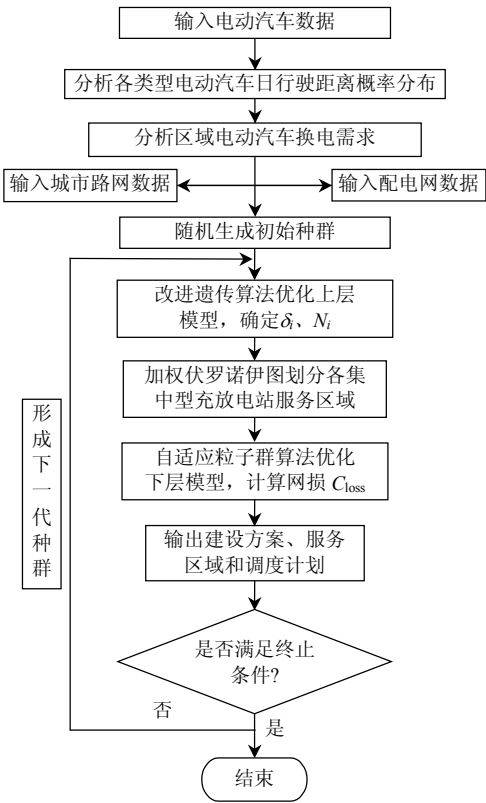


图 4 集中型充电站规划流程图

Fig. 4 Flow chart of centralized charging station planning

4 算例分析

文中以 100 km² 的规划区为算例，预测规划年的汽车总量为 40 万辆，其中公交车、出租车和私家车的比例为 1: 2.36: 97.18，假设在规划水平年电动公交车占公交车总量的 30%，电动出租车占出租车总量的 30%，电动私家车占私家车总量的 5%，则该规划区共有电动汽车 23 345 辆。该区域电动汽车和各类型车辆日行驶距离概率密度等数据如表 3 所示，根据 1.1 节模型可计算出规划区电动汽车总换电需求为 40 096 块。规划区在规划水平年的负荷总量为 310 MW，有 5 个 110 kV 变电站；区内主干道 6 条。通过城市路网和配电网分析，确定该区域集中型充电站候选站址 3 个，分别为 S-1、S-2、S-3，各站址可用面积不受限制；单套设备占地面积 2 000 m²。集中型充电站变压器容量为 8 000 kVA、变比为 110/0.4^[5]，假设该变压器的功率因数为 0.9、效率为 90%、充电机效率为 90%，则单套充电设备可配备 580 台充电机，单套充电设备的充电功率为 5.8 MW。

表 3 规划区电动汽车换电需求

Tab. 3 Exchange battery demand of planning region						
电动汽车类型	日行驶距离概率密度分布			保有量/辆	单块电池容量/(kW·h)	换电需求/块
分布类型	μ	σ				
公交车	正态分布	154.52	41.61	1194	25	2430
出租车	正态分布	461.9	54.63	2817	25	14436
私家车	对数正态分布	3.69	0.88	19334	25	23230

利用上面所介绍的算法对模型进行求解，得到集中型充电站的两个最优规划方案，如表 4 所示。

表 4 集中型充电站最优规划方案

Tab. 4 Optimal planning schemes of centralized charging stations								
方案	位置	套数/套	容量/MW	总费用/万元	建设运行费用/万元	网损/万元	网损降低/%	负载率
1	S-2	1	5.8	2003.98	2003.52	0.46	24.3	0.66
	S-3	5	29					0.73
2	S-3	6	34.8	1970.4	1969.94	0.46	24.3	0.72

从表 4 中可以看出，这两种优化方案的负载率都维持在 60%~80%；从总费用来看两个方案的目标函数值比较接近，方案 2 总费用比方案 1 少。在投资相差不大的情况下，方案 1 建设两个集中型充电站比方案 2 建设一个集中型充电站具有更好的适应性：2 个充电站比 1 个充电站将有更广的服务半径，电池配送更容易；每个充电站配置的容量相对

要小,易于满足充电站扩充要求;充电站通过线路接入电网,对电网损耗及线路功率都有影响,未来集中型充电站负荷增长时不易出现线路过载和损耗增加。

图5为两种最优方案下加权伏罗诺伊图服务区域划分结果,图中直线为交通道路;粗直线为两集中型充电站的服务区域边界;空心圆为电动汽车负荷分布;实心圆为变电站的位置;实心正方形表示集中型充电站的建设位置;实心圆与实心正方形之间的直线表示新建线路。

图6、7分别为两个最优方案所对应的集中型充电站典型日调度安排。图6中两条曲线表示方案1中集中型充电站S-2和S-3的各时段调度值;图7中曲线表示方案2中集中型充电站S-3的各时段调度值。调度值的正、负分别表示集中型充电站充、放电,两个方案在各时段的调度值总体上满足了在电网负荷高峰时段放电、低谷时段充电的要求,对电网起到了削峰填谷的作用。

由于这两个方案中建设的充电设备数量相同、每天的换电需求相同,且电网对所有集中型充电站统一调度,所以这两个方案的典型日各时段总的调度值相同,将电网原负荷与经过优化调度后的方案

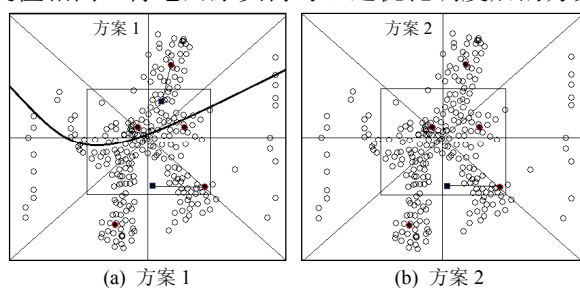


图5 集中型充电站服务区域划分

Fig. 5 Service area of centralized charging stations

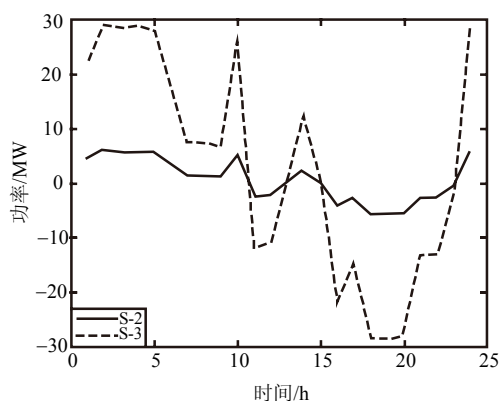


图6 方案1集中型充电站日调度

Fig. 6 Centralized charging station daily dispatching of scheme 1

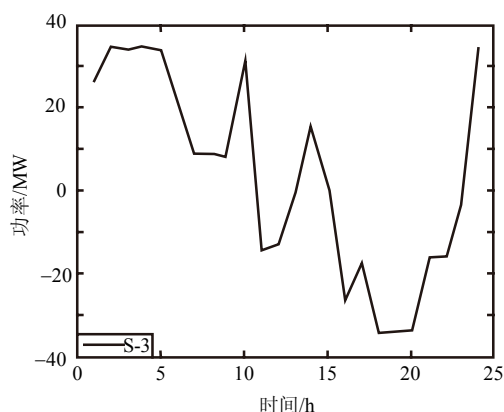


图7 方案2集中型充电站日调度

Fig. 7 Centralized charging station daily dispatching of scheme 2

进行比较如图8所示,从图8中可以看出,经过优化调度降低了电网负荷曲线的峰值、提高了电网负荷曲线的谷值,很大程度上降低了电网的峰谷差,减小了电网的损耗。

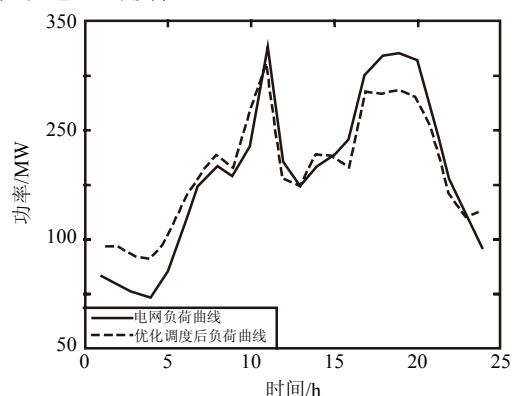


图8 电网负荷曲线比较

Fig. 8 Comparison of load curves

5 结论

1) 本文建立了符合集中型充电站规划要求的电动汽车换电需求模型,该模型从电动汽车本身的运行规律出发,使电动汽车换电需求预测不受充电方式及荷电状态的影响,为集中型充电站的规划奠定了基础。

2) 将加权伏罗诺伊图运用到集中型充电站服务区域的划分,使电动汽车负荷在各集中型充电站间分布更为合理,避免了负载率越限导致集中型充电站过负荷或欠负荷情况发生。

3) 考虑集中型充电站的经济性和对配电网的削峰填谷作用,建立了一个综合全面的集中型充电站的二层规划模型,利用改进遗传算法和自适应粒子群的混合智能算法对某规划区进行了规划,结果表明本文提出的模型能够得到合理的集中型充电

站规划方案, 负荷曲线得到优化, 网损得到降低, 提高了系统运行的安全性和可靠性。

参考文献

- [1] Schneider K, Gerkensmeyer C, Kintner-Meyerm, et al. Impact assessment of plug-in hybrid vehicles on Pacific Northwest distribution systems[C]//Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting, Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008: 1-6.
- [2] 张文亮, 武斌, 李武峰, 等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 1-5.
Zhang Wenliang, Wu Bin, Li Wufeng, et al. Discussion on development trend of battery electric vehicles in China and its energy supply mode[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 1-5(in Chinese).
- [3] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-7.
Song Yonghua, Yang Yuexi, Hu Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-7(in Chinese).
- [4] 电动汽车科技发展“十二五”专项规划[OL/EB]. <http://www.most.gov.cn/tztg/201204/W020120420547632346015.pdf>. [2012-3-6] (in Chinese).
- [5] 高赐威, 张亮, 薛飞, 等. 考虑集中型充电站定址分容的电网规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 40-46.
Gao Ciwei, Zhang Liang, Xue Fei, et al. Grid planning considering capacity and site of large-scale centralized charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 40-46(in Chinese).
- [6] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
Gao Ciwei, Zhang Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [7] Clement-nyns K, Haesene, Driesen J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [8] 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.
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(in Chinese).
- [9] Bradley T, Quinn C. Analysis of plug-in hybrid electric vehicle utility factors[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(16): 5399-5408.
- [10] Peterson S, Whitacre J F. The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(8): 2377-2384.
- [11] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.
Luo Zhuowei, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42(in Chinese).
- [12] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
Tian Liting, Shi Shuanglong, Jia Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130(in Chinese).
- [13] Callaway D S, Hiskens I A. Achieving controllability of electric loads[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 184-199.
- [14] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 30-37.
Yao Weifeng, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37(in Chinese).
- [15] Caramanis M, Foster J M. Management of electric vehicle charging to mitigate renewable generation intermittency and distribution network congestion[C]//Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control. Shanghai, China: IEEE, 2009: 4717-4722.
- [16] 邹文, 吴福保, 刘志宏. 实时电价下插电式混合动力汽车智能集中充电策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 62-67.
Zou Wen, Wu Fubao, Liu Zhihong. Centralized charging strategies of plug-in hybrid electric vehicles under electricity markets based on spot pricing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 62-67(in Chinese).
- [17] 葛少云, 黄镠, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 1-5.
Ge Shaoyun, Huang Liu, Liu Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 1-5(in Chinese).
- [18] 于大洋, 宋曙光, 张波, 等. 区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 24-29.
Yu Dayang, Song Shuguang, Zhang Bo, et al. Synergistic dispatch of PEVs charging and wind power in Chinese regional power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 24-29(in Chinese).
- [19] 王贵斌, 赵俊华, 文福拴, 等. 配电系统中电动汽车与可再生能源的随机协同调度[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 22-29.

- Wang Guibin, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. Stochastic optimization dispatching of plug-in hybrid electric vehicles in coordination with renewable generation in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 22-29(in Chinese).
- [20] Hajimiragha A, Caizares C A, Fowi ER M W, et al. Optimal transition to plug-in hybrid electric vehicles in Ontario, Canada, considering the electricity-grid limitations[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 690-701.
- [21] 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(in Chinese).
- [22] 李如琦, 苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 58-61.
- Li Ruqi, Su Haoyi. Optimal allocation of charging facilities for electric vehicles based on queuing theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 58-61(in Chinese).
- [23] 任玉珑, 史乐峰, 张谦, 等. 电动汽车充电站最优分布和规模研究[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 53-57.
- Ren Yulong, Shi Lefeng, Zhang Qian, et al. Optimal distribution and scale of charging stations for electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 53-57(in Chinese).
- [24] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 54-59.
- Liu Zhipeng, Wen Fushuan, Xue Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 54-59(in Chinese).
- [25] 唐现刚, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于计算几何方法的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 24-30.
- Tang Xiangang, Liu Junyong, Liu Youbo, et al. Electric vehicle charging station planning based on computational geometry method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 24-30(in Chinese).
- [26] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 32(7): 5-42.
- Du Aihu, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2011, 32(7): 35-42(in Chinese).
- [27] 高赐威, 张亮, 薛飞, 等. 集中型充电站容量规划模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 27-34.
- Gao Ciwei, Zhang Liang, Xue Fei, et al. Study on capacity and site planning of large-scale centralized charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 27-34(in Chinese).
- [28] Taylor M J, Alexander A. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations[C]//IEEE Power &Energy Society General Meeting. Calgary, Canada: IEEE, 2009: 1-6.
- [29] 苗增强, 姚建刚, 李婷, 等. 改进的多目标遗传算法在配电网规划中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 63-67.
- Miao Zengqiang, Yao Jiangang, Li Ting. Application of improved multi-objective genetic algorithm distribution network planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2009, 21(5): 63-67(in Chinese).
- [30] 路志英, 葛少云, 王成山. 基于粒子群优化的加权伏罗诺伊图变电站规划[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 35-41.
- Lu Zhiyin, Ge Shaoyun, Wang Chengshan. Substation location planning of the weighted voronoi diagram based on particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 35-41.
- [31] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 64-70.
- Ji Zhen, Liao Huilian, Wu Qinghua. Particle swarm optimization algorithm and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009: 64-70.
- [32] 刘自发. 基于智能优化算法的配电网规划与优化运行研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- Liu Zifa. Study on distribution network planning and optimization based on intelligent optimization algorithms [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.



所丽

收稿日期: 2013-12-24。

作者简介:

所丽(1986), 女, 工学硕士, 研究方向为集中型充电站选址定容规划与优化调度, suoli19871128@163.com;

唐巍(1971), 女, 教授博士生导师, 研究方向为配电网规划与经济运行、配电网可靠性评估、分布式发电与微电网技术, wei_tang@cau.edu.cn;

白牧可(1985), 女, 博士研究生, 主要研究方向分布式发电、配电网规划与评估研究, baimuke@163.com;

张璐(1990), 男, 博士研究生, 主要研究配电网经济运行, 602996165@qq.com。

(责任编辑 王剑乔)