基于改进 NSGA-II 的社区电动汽车充电站 优化充电策略

王育飞.蔡传高.薛 花

(上海电力学院 电气工程学院,上海 200090)

摘要:提出基于改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II)的社区电动汽车充电站优化充电策略。首先,以电动汽 车充电容量和配电变压器容量限制为约束条件,构建以单位电量充电费用最少、电网侧负荷方差最小为目标的 电动汽车充电站多目标充电模型:然后,针对传统 NSGA-II 存在的难以生成满足约束条件的初始种群、Pareto 解集分布不均和最优解性能不高的缺点,提出改进初始种群生成和拥挤度比较算子相结合的 NSGA-II 对模型进行求 解,并采用基于信息熵的序数偏好法从最终 Pareto 解集中选择最优折中充电方案:最后,通过算例仿真验证了 所提算法的有效性,表明改进NSGA-II能在较大程度上提高电网侧的负荷水平和用户的充电性价比。

关键词: 电动汽车; 社区充电站; NSGA-II; 多目标优化; 充电策略; Pareto 最优

中图分类号: TM 73:U 469.72

文献标识码: A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.015

引言 0

电动汽车具有高能效、绿色环保、零排放和低噪 声等特点,各国政策的引导和扶持使其在近年来得 到了快速的发展[1-2]。大规模电动汽车接入电网充电 会给电力系统的安全和稳定运行带来新的挑战。大 量研究表明,在缺乏有序引导的前提下,电动汽车的 无序充电行为会进一步加大电网的负荷峰谷差^[3]、 降低变压器寿命[4]、恶化电能质量[5]以及增加电网损 耗69,从而增大电网的运行控制难度。根据电动汽 车的充电基础设施发展指南印,社区充电站将成为 电动汽车用户充电的理想场所。因此,对社区充电站 内电动汽车的充电行为进行正确引导和规范,研究电 动汽车的优化充电策略,具有重要理论意义和现实 价值[8-9]。

目前,相关科研人员在电动汽车优化充电策略方 面做了一系列有意义的工作。优化充电策略的求解 算法主要包括传统优化算法和智能优化算法。传统 优化算法有线性规划^[10]、二次规划^[11]、混合整数规 划12]和拉格朗日松弛法13]等。文献[10]通过线性规 划算法对所建立的充电模型进行求解:文献[11]对 建立的凸二次规划模型进行求解,以降低电动汽车 接入配电网所引起的网损。这一类优化算法有清晰 的求解方法,求解快捷简便,但随着电动汽车规模的 增加,其求解存在较大困难。智能优化算法是基于

收稿日期:2017-08-07;修回日期:2017-10-19

物理现象或生物智能衍生出的一种随机搜索算法. 包括粒子群优化算法[14]、蚁群算法[15]、模拟退火算 法161和遗传算法[17-19]等。该类算法对于大规模电动汽 车优化充电模型的多约束、优化目标的非线性特点具 有较好的适用性。文献「14]利用改进粒子群优化算 法求解以网侧负荷波动最小为目标的优化充电策 略,文献[17]从集群角度对电动汽车充电过程进行 优化,使用遗传算法求解充电模型,但文献[14,17] 仅以电网侧负荷峰谷差或方差作为优化目标,并未 考虑用户侧利益;文献[18-19]通过建立电动汽车与 电网或者微电网联合调度的多目标充电模型,采用 多目标非支配排序遗传算法 NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ)^[20]进行求解,虽然取得 了一定的效果,但对于传统 NSGA-II 中存在的难以 通过随机方法生成满足约束条件的初始种群问题并 没有提及。此外,传统 NSGA-II 收敛速度慢、Pareto 解集分布不均等劣势都将影响电动汽车优化充电的 最终方案。

本文以社区充电站为研究对象,建立以单位电量 充电费用最少和电网侧负荷方差最小为目标的电动 汽车充电模型,提出改进 NSGA-II 对充电模型进行求 解,利用 MATLAB 软件仿真分析改进 NSGA-II 充电 策略和传统 NSGA-II 充电策略对电网侧负荷水平和 用户侧充电性价比的影响,验证所提电动汽车优化充 电策略的有效性。

社区电动汽车充电站优化充电模型 1

由于私家车平时主要用于出行上班和休闲旅 游,且晚上时段在社区停留时间较长,充电具有灵活 性,易于调度,为此社区充电站定位为满足夜晚时段 用户的充电需求,且是用户停留在固定停车位等待统

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407114);上海市自 然科学基金资助项目(15ZR1418000);上海市科技创新行动计 划项目(16DZ0503300)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407114), the Natural Science Foundation of Shanghai(15ZR1418000) and the Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan(16DZ0503300)

一调度的电动汽车慢速充电站,而不是"即插即用" 式的快速充电站。

为了同时兼顾用户侧经济性指标和电网侧运行 技术指标,在峰谷分时电价的基础上,针对社区充电 站优化充电问题,建立以单位电量充电费用最少和电 网侧负荷方差最小为目标的电动汽车充电优化模 型。电动汽车无序充电对电网的运行造成不利影响, 以单位电量充电费用最少为优化目标一方面提升了 用户充电的性价比(即充电费用与充电电量的比值), 增加了用户充电的灵活性;另一方面可以转移电动汽 车负荷至分时电价较低时段充电,有利于电网削峰填 谷。以电网侧负荷方差最小为目标,能较大程度地抑 制网侧负荷波动,使电网侧负荷曲线趋于平稳,保证 电网安全稳定运行。

1.1 目标函数

a. 目标函数1:单位电量充电费用最少。

目标函数1即为充电费用与充电电量的比值, 如式(1)所示。

$$f_{1} = \min \frac{\sum_{t=1}^{T} \sum_{n=1}^{N} P_{n,t} c_{t} \Delta t}{\sum_{t=1}^{T} \sum_{n=1}^{N} P_{n,t} \Delta t}$$
(1)

其中,*T*为时段数;*N*为电动汽车数量;*P_{n,t}*为第*n*辆 电动汽车在时段*t*的充电功率;*c_t*为时段*t*的分时电 价。考虑晚间时段优化充电策略,本文选取的可调度 时间范围为 17:00 至次日 08:00,以1 h 为一个时间 段,即 Δt =1 h,则共计 16 个时间段,即*T*=16。

b. 目标函数 2: 电网侧负荷方差最小。

电网侧负荷方差可以反映负荷变化和波动的程度,该数值越小,则表明负荷波动越趋于平稳。以每辆电动汽车在每个时间段的充电功率为控制变量,则目标函数2如式(2)所示。

$$f_2 = \min \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \left(P_{1,t} + \sum_{n=1}^{N} P_{n,t} - P_{av} \right)^2$$
(2)

$$P_{\rm av} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \left(P_{1,t} + \sum_{n=1}^{N} P_{n,t} \right)$$
(3)

其中, P_{1,t} 为时段 t 不含电动汽车负荷的社区居民负荷, 社区居民负荷和电动汽车充电负荷的总和即为电网侧负荷; P_{av} 为调度总时间段内电网侧负荷的平均值。

1.2 约束条件

a. 充电功率约束。

 $0 \leq P_{n,t} \leq P_{\max} \quad \forall n,t$ (4) 其中, P_{\max} 为电动汽车最大充电功率。

b.电动汽车充电电量约束。

$$\sum_{n=1}^{N} \underline{B}_{n} \leqslant \sum_{t=1}^{T} \sum_{n=1}^{N} P_{n,t} \Delta t + \sum_{n=1}^{N} \operatorname{SOC}_{n}^{\operatorname{ini}} B_{n} \leqslant \sum_{n=1}^{N} B_{n}$$
(5)

其中,B_n为第 n 辆电动汽车所需充满的电量;<u>B</u>n 为

充电电量下限;SOCⁱⁿⁱ 为第n辆电动汽车的初始荷电状态。

c. 由于大规模电动汽车充电易对电网侧负荷造 成波动,为了防止电动汽车在相邻2个时段功率变化 太大,做如下限制:

$$0 \leq \left| \sum_{n=1}^{N} P_{n,l+1} - \sum_{n=1}^{N} P_{n,l} \right| < \Delta P \tag{6}$$

其中, ΔP 为相邻 2 个时段电动汽车充电负荷的波动 上限。

d. 配电变压器下接有社区居民负荷和电动汽车 充电负荷,需要对其容量进行限制,否则变压器超载 运行将会危及电网的安全可靠运行,约束如下;

$$P_{1,\iota} + \sum_{n=1}^{N} P_{n,\iota} \le \rho S \cos \phi \tag{7}$$

其中,S为变压器额定容量; ρ 为变压器效率; $\cos\phi$ 为社区平均负荷功率因数。

e.目标荷电状态 SOC(State Of Charge)约束如式 (8)所示。

$$\operatorname{SOC}_{\min} \leq \operatorname{SOC}_{n,t} \leq \operatorname{SOC}_{\max}$$
 (8)

其中,SOC_{n.t}为第 n 辆电动汽车在时段 t 的荷电状态;SOC_{max}和 SOC_{min}分别为荷电状态上、下限。为了保证电动汽车动力电池充电安全和用户用车需求,需要对每个时段每辆电动汽车的荷电状态进行限制。

在所建立的模型中,把接入社区充电站的电动汽 车当作一个集群来集中调度。集中充电站在当前技 术上是可行的,且控制方便简易,可以大幅减少电动 汽车参与电网调控的成本。

2 基于改进 NSGA-Ⅱ 的电动汽车充电策略

2.1 传统 NSGA-II 的缺陷

NSGA-II 是处理多目标问题的一种优化算法。 NSGA-II 采用随机方法生成初始种群,但在处理电动 汽车多约束优化充电问题时,极难产生满足约束条 件的初始解,导致算法收敛速度慢,寻优效率偏低。 此外,NSGA-II 中拥挤度比较算子存在缺陷,如图1所 示,位于同一非支配层的点 b 和点 d 由于拥挤度相同 都将被选中遗传到下一代,可能造成种群局部堆积, 影响种群的分布性。对此,本文改进传统 NSGA-II, 提出结合初始种群生成和拥挤度比较算子的改进 NSGA-II 以求解电动汽车充电优化问题。



图 1 拥挤度示意图 Fig.1 Schematic diagram of crowding distance

2.2 改进 NSGA- II

2.2.1 改进初始种群生成方法

将所有电动汽车当作一个集群来控制,每个时段 电动汽车总充电功率表示如下:

$$\boldsymbol{P} = (P_1, P_2, \cdots, P_V) \quad \boldsymbol{P} \subseteq \boldsymbol{E}_V$$
(9)
其中, \boldsymbol{E}_V 为 V 维空间向量。

规定 W 为满足约束条件的集合, W 为违反约束 条件的集合, 分别如式(10)、(11)所示。

$$W = \{ j \mid c_j(\mathbf{P}) > 0, j = 1, 2, \cdots, M \}$$
(10)

$$\overline{W} = \{ j \mid c_i(\boldsymbol{P}) \leq 0, j = 1, 2, \cdots, M \}$$
(11)

其中, *M* 为约束条件的个数; *j* 为约束条件的编号; c_i 为约束条件的值。

改进初始种群生成方法的步骤如图 2 所示,其 中λ_k为搜索步长。





Fig.2 Steps of improved initial population generation method

按图 2 所示的初始种群方法得到初始种群第 一个个体 **P**₁^(a),简记为 **P**_{P1},种群其余个体按式(12) 生成。

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{P}r+1} = \boldsymbol{P}_{\mathrm{P}r} + \alpha (\boldsymbol{P}_{\mathrm{P}r+1} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{P}r})$$
(12)

其中,r=1,2,...,R-1为种群个体编号,R为种群数; α 为收缩因子, $\alpha>0$ 。直至找出满足要求的所有初始 种群。

2.2.2 改进拥挤度比较算子

改进 NSGA-II 中同一非支配层里个体 *i* 的距离 差值 *d_i* 定义如式(13)所示。

$$d_{i} = \left| \sqrt{\sum_{m} (f_{m}(i-1) - f_{m}(i))^{2}} - \sqrt{\sum_{m} (f_{m}(i+1) - f_{m}(i))^{2}} \right|$$
(13)

其中, $f_m(i+1)$ 和 $f_m(i-1)$ 分别为第 i+1个个体和第 i-1个个体的第 m个目标函数值。

采用改进拥挤度比较算子选择个体的具体步骤 如下。

a. 将父代、子代种群相结合,生成种群数为 2*R* 的新种群,对其进行非支配排序,得到非支配层 *F*₁、 *F*₂和*F*₃等。

b. 对每一非支配层中的个体计算拥挤度,并根据式(13)计算距离差值。

c. 从非支配层 *F*₁ 层开始,如果 *F*₁ 层的个体数量 大于 *R*,则从中选取拥挤度较大的 *R* 个个体进入下一 代新种群。若其中多个个体拥挤度相同,则再依据 距离差值,从中筛选出距离差值较小的个体,直至筛 选出的个体数量达到 *R*。如果 *F*₁ 层个体数量小于 *R*, 则将 *F*₁ 层中所有个体选择进入新种群。其余非支配 层 *F*₂,*F*₃ 依此类推。

为了比较改进 NSGA-II 是否在种群分布性上比 传统 NSGA-II 更具优势,采用文献[20]中的种群分 布性指标 Δ 来进行对比。

通过上述改进初始种群和拥挤度比较算子相结合的 NSGA-II 得出的是一组最优 Pareto 解集,含有多个选择方案,为此采用基于信息熵的序数偏好法^[21] TOPSIS(Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)从众多方案中选择电动汽车最优充电方案。

2.3 电动汽车优化充电策略求解流程

所提改进 NSGA-II 用于求解电动汽车充电站优 化充电策略的流程如图 3 所示。当电动汽车到达充 电站后,充电站获取基础信息,包括每个用户所需充 电电量和电网侧社区居民负荷数据以及分时电价数 据等,然后根据图 3 所示步骤制定电动汽车最优充 电方案。

3 算例分析

为了验证所提改进 NSGA-II 用于求解电动汽车 充电站优化充电策略的有效性,在如图 4 所示的电 动汽车充电站架构下进行仿真分析。

3.1 仿真参数设置

为了便于电动汽车优化充电问题的分析和求 解,设定以下条件。

a. 假设所有电动汽车用户均愿意参加社区充电 站有序充电,电动汽车在优化时段内均停靠在充电 站固定停车位,等待充电站集中调度。

b. 根据文献[23],电动汽车采用常规充电模式



图 3 电动汽车充电站优化充电流程

Fig.3 Optimized charging process of electric vehicle charging station



图 4 电动汽车充电站结构框图 Fig.4 Structure diagram of electric vehicle charging station

进行充电,充电功率可调,最大充电功率 P_{max} =7 kW, 电池容量 B=60 kW·h;充电前电动汽车电池荷电状 态服从正态分布 N(0.45,0.1²),SOC_{min}=0.2,SOC_{max}= 1;配电变压器额定容量 S=2800 kV·A,效率 ρ =0.95, 社区平均负荷功率因数 cos ϕ =0.85。

c. 根据文献[23],电动汽车无序充电时,到达充 电站的时间服从正态分布 N(19,1.5²),离开充电站 的时间服从正态分布 N(7.75,1.2²)。

d. 在优化充电场景下,传统 NSGA-Ⅱ及改进 NSGA-Ⅱ 的参数设置为:种群规模 *R*=200,进化代数 为1000,交叉率为0.9,变异率为1/16。 **e.** 假设电动汽车充电电量下限为 70%,相邻时段 电动汽车充电功率波动 $\Delta P=200 \, kW$ 。

f. 充电站从电网购电的分时电价采用上海市电网销售电价^[22],具体划分时段如表1所示。

表 1 分时电价 Table 1 Time-of-use electricity price

| 时段 | 电价/ [元・(kW・h) ⁻¹] | 时段 | 电价/ [元・(kW・h) ⁻¹] |
|-------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 17:00-18:00 | 0.773 | 22:00至次日 06:00 | 0.286 |
| 18:00-21:00 | 1.224 | 06:00-08:00 | 0.773 |
| 21:00-22:00 | 0.773 | 08:00-09:00 | 1.224 |

g. 根据文献[18],假设高峰时段居民用户平均 用电功率为 2.2 kW,居民户数为 1000 户,电动汽车 数量 N=100 辆。

当电动汽车抵达充电站进行充电时,电池管理系 统将记录电动汽车动力电池的类型、容量以及初始 荷电状态等信息,并通过通信设备传至智能充电装置, 最终控制中心经过决策将最优充电策略下达给电动 汽车用户。

3.2 仿真分析

a. 传统 NSGA-II 和改进 NSGA-II 优化性能对比。

图 5 给出了传统 NSGA-II 和改进 NSGA-II 的 Pareto 前沿,表 2 为从图 5 中所选出的 6 组充电方 案。由 1.1 节设定的 2 个目标函数可知,通过对传 统 NSGA-II进行改进,求解出的 Pareto 前沿比改进 前算法更优,搜索空间更加广阔,可以寻优到目标 函数 *f*₁<0.29 元/(kW·h)的范围,进一步提高了解的





表 2 传统 NSGA-II 与改进 NSGA-II 的优化方案对比 Table 2 Optimization scheme comparison between traditional NSGA-II and improved NSGA-II

| | $f_1 / [\vec{\pi} \cdot (\mathbf{kW} \cdot \mathbf{h})^{-1}]$ | | f_2 / kW^2 | | |
|------------|---|--------------|-----------------------|-----------------------|--|
| 允电 = 方案 | 传统 NSGA-II | 改进 NSGA-Ⅱ | 传统 NSGA-II | 改进 NSGA-II | |
| 1 | 0.2956 | 0.2948 | 1.896×10^{5} | 1.891×10^{5} | |
| 2 | 0.3023 | 0.3009 | 1.812×10^{5} | 1.809×10^{5} | |
| 3 | 0.3061 | 0.3059 | 1.761×10^{5} | 1.760×10^{5} | |
| 4 | 0.3111 | 0.3111 | 1.714×10^{5} | 1.713×10^{5} | |
| 5 | 0.3172 | 0.3162 | 1.681×10^{5} | 1.678×10^{5} | |
| 6 | 0.3257 | 0.3257 | 1.634×10^{5} | 1.630×10^{5} | |

收敛性,提升了最优解集的质量。

在 Pareto 最优解集分布性方面,利用传统算法和 改进算法分别在 MATLAB 仿真软件中独立求解 10 次,结果如表 3 所示。对比分析图 5 中的局部放大图 和表 3 中的结果,可以看出:采用"拥挤度为主、距离 差值为辅"的改进拥挤度比较算子后,改进算法的 Pareto 最优解集分布性指标 Δ 普遍有所减小,改进算 法 Δ 的 10 次平均值为 0.899 097 5,传统算法 Δ 的 10 次平均值为 0.998 861 9,改进算法后种群分布性提 高了 9.9%,分布更加均匀,从而有效地弥补了传统 算法中采用拥挤度比较算子所造成的种群分布不均 问题。

表 3 传统 NSGA-II 与改进 NSGA-II 的 Pareto 最优 解集分布性对比

Table 3 Distribution comparison of Pareto optimal sets between traditional NSGA-II and improved NSGA-II

| | Pareto 最优解集 | | | Pareto 最优解集 | |
|----|-------------|-----------|----|-------------|-----------|
| 次数 | 传统 | 改进 | 次数 | 传统 | 改进 |
| | NSGA-II | NSGA-II | | NSGA-II | NSGA-II |
| 1 | 0.994724 | 0.883475 | 6 | 0.931304 | 0.918730 |
| 2 | 0.952323 | 0.917 547 | 7 | 0.995780 | 0.901 500 |
| 3 | 1.181824 | 0.885128 | 8 | 0.911920 | 0.913225 |
| 4 | 1.125439 | 0.885455 | 9 | 1.042736 | 0.881011 |
| 5 | 0.923039 | 0.887657 | 10 | 0.929530 | 0.917247 |

采用改进初始种群生成方法后,仿真结果对比如 图 6 所示。分析仿真结果可知,改进 NSGA-II 中满 足约束条件的种群个数在 400 代后趋于稳定,而传统 算法在 800 代后才开始稳定,改进算法收敛速度提高 了一倍,很好地克服了传统 NSGA-II 种群收敛速度 慢、难以通过随机方法得到满足所有约束条件可行 解的弊端。



图 6 传统 NSGA-II 与改进 NSGA-II 的种群可行解 个数与进化代数关系

Fig.6 Relationship between quantity of population feasible solutions and evolution generation in traditional NSGA-II and improved NSGA-II

b. 电动汽车最优折中充电方案。

为了有利于决策者从 Pareto 最优解集中选出更 合理的电动汽车优化充电方案,使用 TOPSIS 获取最 优折衷方案,结果如表 4 所示。其中 P₁—P₁₆ 为 17:00 至次日 08:00 各时段电动汽车总充电功率。

最终在最优折中方案下的电网侧负荷曲线如图 7 所示。由图 7 可看出,无序充电时网侧总负荷超出 配电变压器容量上限,危害电网安全运行。在传统 NSGA-II 的最优折中方案下 f₁=0.322 6 元/(kW·h)、

表 4 电动汽车最优折中充电方案 Table 4 Optimal compromise charging scheme of electric vehicles

| 功率/kW | | 功率/kW | | | |
|-------------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|
| 变量名 | 传统 | 改进 | 变量名 | 传统 | 改进 |
| | NSGA - II | NSGA - II | | NSGA - II | NSGA-II |
| $P_1 - P_5$ | 0 | 0 | P_{11} | 650.7610 | 685.4519 |
| P_6 | 0.0009 | 0.1157 | P_{12} | 613.3650 | 597.7982 |
| P_7 | 30.7234 | 41.4598 | P_{13} | 418.4737 | 401.5923 |
| P_8 | 230.4817 | 239.9529 | P_{14} | 218.6128 | 202.0977 |
| P_9 | 429.7824 | 438.7304 | P_{15} | 20.5144 | 3.3600 |
| P_{10} | 566.5506 | 568.1164 | P_{16} | 0 | 0 |



图 7 各充电场景下电网侧负荷对比 Fig.7 Comparison of power grid side load in different charging scenarios

 f_2 =1.66983×10⁵ kW²;在改进 NSGA-II 的最优折中方 案下 f_1 =0.3175元/(kW·h)、 f_2 =1.66902×10⁵ kW²。 与传统算法相比,改进算法的 f_1 下降了1.58%, f_2 下 降了81kW²,且优化充电时2种算法均有效地实现了 削峰填谷。因此,改进 NSGA-II 能在较大程度上提 高电网侧负荷水平和用户充电性价比,证明了所提算 法的有效性。

4 结论

针对社区充电站电动汽车充电优化问题,本文提 出了改进初始种群生成和拥挤度比较算子相结合的 NSGA-II,并根据 MATLAB 软件仿真计算了电动汽车 优化充电时用户侧单位电量充电费用和电网侧负荷 方差 2 个优化目标,对 2 种算法进行了对比,得到如 下结论:

a.改进 NSGA-II 能够很好地处理具有复杂约束的电动汽车充电优化问题,与传统算法相比,改进算法更容易获得可行解,种群的收敛速度提高一倍, Pareto 前沿种群分布性提高 9.9%,克服了传统算法的缺陷;

b. 与传统算法相比,利用所提改进 NSGA-II 得 到的优化方案中用户侧单位电量充电费用降低了 1.58%,电网侧负荷方差下降 81 kW²,优化指标得到 了进一步提升。

参考文献:

[1] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[EB/OL].

(2016-10-26) [2017-05-10]. http://news.xinhuanet.com/2016-10/31/c_1119816331.htm.

- [2] 国务院. 中国制造 2025[EB/OL]. (2015-05-08)[2017-05-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784. htm.
- [3] KANG Q,FENG S W,ZHOU M C,et al. Optimal load scheduling of plug-in hybrid electric vehicles via weight-aggregation multiobjective evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(9):2557-2568.
- [4] ARAVINTHAN V, JEWELL W. Controlled electric vehicle charging for mitigating impacts on distribution assets [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2):999-1009.
- [5] 陈静鹏,朴龙健,艾芊. 基于改进贪心算法的大规模电动汽车充 电行为优化[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):38-44.
 CHEN Jingpeng,PIAO Longjian,AI Qian. Charging optimization based on improved greedy algorithm for massive EVs[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):38-44.
- [6] 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.
 [7] 发改委.关于印发《电动汽车充电基础设施发展指南(2015—2020)

- 年)》的通知[EB/OL]. (2015–11–18)[2017–05–10]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151117_758762.html.
- [8] KULVANITCHAIYANUNT A, CHEN V C P, ROSENBERGER J, et al. A linear program for system level control of regional PH-EV charging stations [C] // Industry Applications Society Annual Meeting. Dallas, Texas, USA: IEEE, 2015:2046-2052.
- [9] RAHMAN I,VASANT P M,SINGH B S M,et al. Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58:1039-1047.
- [10] 陈奇芳,刘念,赵天阳,等. 基于滚动线性规划的光伏充电站自动需求响应[J]. 电网技术,2016,40(10):2967-2974.
 CHEN Qifang,LIU Nian,ZHAO Tianyang,et al. Automatic demand response for PV charging station based on receding linear programming[J]. Power System Technology,2016,40(10):2967-2974
- [11] 占恺峤,宋永华,胡泽春,等. 以降损为目标的电动汽车有序充 电优化[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):11-18.
 ZHAN Kaiqiao,SONG Yonghua,HU Zechun, et al. Coordination of electric vehicle charging to minimize active power losses[J].
 Proceedings of the CSEE,2012,32(31):11-18.
- [12] 齐峰,张华一,文福拴,等. 计及电动汽车车主意愿的集成光热 充电站优化运行策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(6);229-235.
 QI Feng,ZHANG Huayi,WEN Fushuan, et al. Optimal operating strategy considering EV owner's willingness for CSP-based EV charging station[J]. Electric Power Automation Equipment,2017, 37(6);229-235.
- [13] 邵成成,王锡凡,王秀丽.发电成本最小化的电动汽车分布式充放电控制[J].电力自动化设备,2014,34(11):22-26.
 SHAO Chengcheng,WANG Xifan,WANG Xiuli. Decentralized EV charge/discharge control with minimum generation cost[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):22-26.
- [14] 姚友素,马建伟,戚佳金,等. 集中充电站参与配电网峰谷调控

策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):130-135.

YAO Yousu, MA Jianwei, QI Jiajin, et al. Strategy for central charging station participating in peak-valley regulation of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):130-135.

- [15] YANG S,WU M,YAO X,et al. Load modeling and identification based on ant colony algorithms for EV charging stations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4):1997-2003.
- [16] SOUSA T,VALE Z,CARVALLHO J P,et al. A hybrid simulated annealing approach to handle energy resource management considering an intensive use of electric vehicles[J]. Energy,2014, 67:81-96.
- [17] 陈静鹏,艾芊,肖斐. 基于集群响应的规模化电动汽车充电优化 调度[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):43-48.
 CHEN Jingpeng,AI Qian,XIAO Fei. Optimal charging scheduling for massive electric vehicles based on cluster response[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(22):43-48.
- [18] 佟晶晶,温俊强,王丹,等. 基于分时电价的电动汽车多目标优 化充电策略[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(1):17-23.
 TONG Jingjing,WEN Junqiang,WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control,2016,44(1):17-23.
- [19] 庄怀东,吴红斌,刘海涛,等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. 电工技术学报,2014,29(增刊1):365-373.
 ZHUANG Huaidong,WU Hongbin,LIU Haitao, et al. Multi-objective economic dispatch of microgrid system considering electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014, 29(Supplement 1):365-373.
- [20] DEB K,PRATAP A,AGARWAL S,et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm:NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.
- [21] TZENG G H, HUANG J J. Multiple attribute decision making: methods and applications[M]. [S.l.]:CRC press, 2011:173-186.
- [22] 上海市电力公司. 上海市电网销售电价[EB/OL]. [2017-05-15]. http://sh.bendibao.com/cyfw/2015526/132966.shtm.
- [23] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 基于动态分时电价的电动汽车充 电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3638-3646.

XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic time-of-use tariffs[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3638-3646.

作者简介:



王育飞(1974—),男,安徽肥东人,副教 授,博士,主要研究方向为电能质量分析与 控制、电力储能应用技术和电动汽车有序充 电(**E-mail**;wangyufei@shiep.edu.cn);

蔡传高(1992—),男,湖北黄冈人,硕士 研究生,主要研究方向为电动汽车有序充电 和电力储能应用技术(E-mail:1210609191@ qq.com);

王育飞

薛 花(1979—), 女, 江苏无锡人, 副教授, 博士, 主要研究 方向为电能质量分析与控制(**E-mail**: xuehua@shiep.edu.cn)。

Ð

Optimized charging strategy of community electric vehicle charging station based on improved NSGA-II

WANG Yufei, CAI Chuangao, XUE Hua

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: An optimized charging strategy for community electric vehicle charging station based on improved NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) is proposed. Firstly, the multi-objective charging model of electric vehicle charging station is established to minimize the charging cost of per unit electric energy and the load variance of grid side, with the capacity limitation of electric vehicle charging and distribution transformers as constraints. Then, aiming at the shortcomings of traditional NSGA-II, such as difficulties for generating the initial populations satisfying the constraints, uneven distribution of Pareto solution sets and low performance of optimal solution sets, an improved NSGA-II, combining improved initial population generation method with comparison operator of crowding distance, is proposed to solve the model. The optimal compromise charging scheme is selected from the final Pareto solution sets by TOPSIS(Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution) based on information entropy. Finally, simulative results of examples verify the effectiveness of the proposed algorithm and show that the improved NSGA-II can improve the grid-side load level and charging cost performance of customers in large extent.

Key words: electric vehicles; community charging station; NSGA-II; multi-objective optimization; charging strategy; Pareto optimality

(上接第 108 页 continued from page 108)

Static reactive power/voltage assessment of sensitivity scenarios with multiple wind farms

MING Jie, XIANG Hongji, DAI Chaohua, CHEN Weirong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: There exists complex nonlinear impact of wind power on power system operation, and the traditional wind power scenario model for dealing with the randomness of wind power cannot ensure the consistency of optimal operation of power system and wind power scenario, for which, an analytical method of reactive power/voltage sensitivity scenario for power system with multiple wind farms is proposed. The power loss/voltage sensitivity calculation methods are adopted to calculate the power loss/voltage sensitivities for the correlated output samples of multiple wind farms, the principle component analysis is used to build the combined power loss/voltage sensitivity feature space, on this basis, the power loss/voltage sensitivity scenarios of multiple wind farms are obtained by scenario clustering. The practical data of two wind farms are connected into IEEE 30-bus system for the traditional wind power scenario analysis and the proposed sensitivity scenario analysis, the simulative results verify the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: wind farms; reactive power/voltage optimization; clustering; wind power scenario; sensitivity scenario