

# 大规模分散式充电桩参与电网负荷优化技术研究

杨 斌<sup>1</sup>, 陈振宇<sup>1</sup>, 阮文骏<sup>1</sup>, 孙 宇<sup>2</sup>, 陈嘉栋<sup>3</sup>, 宋 杰<sup>3</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 南京 210024; 2. 国网江苏常州供电公司, 江苏 常州 213003; 3. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106)

## Research on grid load optimization technology participated by large-scale distributed charging piles

YANG Bin<sup>1</sup>, CHEN Zhen-yu<sup>1</sup>, RUAN Wen-jun<sup>1</sup>, SUN Yu<sup>2</sup>, CHEN Jia-dong<sup>3</sup>, SONG Jie<sup>3</sup>

(1.State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 2. State Grid Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213003, China; 3.Nari Technology Development Limited Company, Nanjing 211106, China)

**摘要:**电动汽车(electric vehicles, EV)发展迅速,分散式充电桩参与电网调控蕴含巨大潜力。对比负荷运行典型评估指标,将负荷波动率作为优化目标,重点构建了分散式充电桩参与电网负荷优化的多目标优化模型,提取负荷波动率的关键特征,建立表征负荷波动率的优化目标函数;引入电力奖励积分解决电价不灵活的问题,构建用户成本优化目标函数;以南京市区某配网馈线的典型夏季负荷为例,利用MATLAB工具对2 000辆可参与日调峰汽车、500辆可参与夜填谷汽车的负荷优化进行仿真分析,结果显示电网负荷波动率明显下降,用户成本大大降低。

**关键词:**分散式充电桩;负荷优化;负荷波动率;成本优化;行为约束;MATLAB仿真

**Abstract:** Due to the rapid development of electric vehicles, there is much potential for distributed charging piles to participate in power grid management. Typical evaluation indicators of load operation are compared, load fluctuation rate is selected as the objective of optimization, multiple target optimization model for load optimization with distributed charging piles is established, and the key characteristics of load fluctuation rate are extracted to establish the simple target function describing load fluctuation rate. The inflexibility of electricity pricing is solved by introduction of incentive points, and optimization target function of end user cost is built. Typical summer load conditions of certain distribution system feeder line located in Nanjing is taken for instance. MATLAB is used to simulate the load optimization featuring peak shifting and valley filling participated by 2 000 EVs and 500 EVs. It turns out that the fluctuation rate of grid load reduces obviously and the end users save cost greatly.

**Key words:** distributed charging pile; load optimization; load fluctuation rate; cost optimization; behavior constraints; MATLAB simulation

中图分类号:F407.61;TK018 文献标志码:A

大规模电动汽车随机充放电对电网的影响不可忽视,但电动汽车具有移动储能特性,且负荷特性双向可调,是一种非常灵活的调控资源。电动汽车并网技术V2G一直是电力工作者和学者的研究热点<sup>[1-2]</sup>。文献[3]从配网运行角度分析电动汽车无序充电对配网系统过负荷、节点偏移的影响。文献[4]聚焦在分散式充电桩接入及集中式充电站接入的配网规划问题分析。文献[5]验证了可达性分析应用于电动汽车充电桩布局研究领域的可行性。针对电动汽车的可调性,更多学者倾向于研究

吸引电动汽车主动参与电网调控的电价机制或市场机制<sup>[6-7]</sup>。对分散式充电桩参与电网优化调控的研究包括减少发电成本<sup>[8]</sup>,参与电网调峰可行性<sup>[1]</sup>,后备应急电源<sup>[9]</sup>,平抑光伏波动<sup>[10]</sup>等,并研究了基于分时电价的电动汽车有序充放电策略<sup>[11]</sup>。

江苏电网是特高压受端电网,且随着全球能源互联网的建设推进,本地电源调节备用紧张的问题越来越突出;江苏是我国经济大省,夏季尖峰负荷持续创新高,2017年夏季首破1亿kWh,为全国高峰负荷最大省份,而尖峰负荷持续时长为60~70 h。为解决此类问题,江苏近年来将研究及实践目标转向负荷调控<sup>[12]</sup>,通过负荷调控来实现削峰填谷,目前已针对非工空调、非生产性负荷开展了需求响应、负荷快切、友好互动等多个工程项目,取得显著效果。

随着江苏负荷调控技术发展的深入,配套政策的完善,采集调控能力的提高,以及当前电动汽车增量的持续增加,电动汽车调控开始成为江苏负荷调控的新一重要焦点。相对于集中式充换电站,在

收稿日期:2018-05-22;修回日期:2018-08-23

基金项目:国家重点研发计划资助“城区用户与电网供需友好互动系统”(2016YFB0901100)

作者简介:陈振宇(1973),男,浙江宁波人,硕士,研究员级高级工程师,研究方向为智能用电、需求侧管理、电力营销、电动汽车等;杨斌(1977),男,江苏苏州人,本科,高级工程师,研究方向为智能用电、港口岸电、需求响应等;阮文骏(1988),男,江西抚州人,硕士,工程师,研究方向为智能用电、港口岸电、需求响应等。

居民小区、商场及企业等建立分散式充电桩,满足用户的汽车慢充需求将是EV的主要能源补给方式,且此类充电桩多为用户有充足时间进行V2G互动。本文针对这一类分散式充电桩开展电动汽车参与电网负荷优化建模分析,并以南京新街口地区某馈线典型夏季负荷为例,借助MATLAB软件,针对2000辆可参与日调峰汽车、500辆可参与夜填谷汽车的负荷优化算例进行仿真计算,研究成果为进一步推广电动汽车调控提供技术支撑和数据依据。

## 1 电网负荷调控指标

电网负荷调控指标通常采用峰谷差和负荷率,其中:峰谷差为日最高负荷与最低负荷之差,负荷率为日平均负荷与日最大负荷之比。峰谷差仅反映了日最高负荷和最低负荷关系,负荷率没有涉及低谷负荷,也无法体现负荷的分散程度,故这2个指标都不能全面地衡量电网负荷的变化分布情况,因此引入负荷波动率,将随机变量最基本的数字特征均值和标准差引入进来。

负荷波动率 $l$ 为负荷有功功率的标准差 $\sigma$ 与负荷有功功率的几何均值 $\lambda$ 之比

$$l = \frac{\sigma}{\lambda} \times 100\% \quad (1)$$

式中:标准差 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$ 为一组负荷有功功率值; $\mu$ 为这组负荷有功功率值的算术平均值;几何均值 $\lambda = \sqrt[N]{x_1 \times x_2 \times \cdots \times x_N}$ 。

负荷波动率可以直观反映负荷的分散程度,负荷波动率越小,说明负荷越平稳,供电情况越好,电网运行越经济。

## 2 大规模分散式充电桩参与电网负荷优化调控模型

### 2.1 调控模型目标函数

#### (1) 电网负荷波动最优

提取负荷波动率的定义中的关键信息,在当前负荷率的条件下减小负荷曲线的峰谷比值,构建分散式电动汽车参与电网负荷优化的目标模型

$$\begin{cases} F_1 = \min \sum_{k=1}^{24} (P_{Gk} + P_{Ek} - P_{avg})^2 \\ P_{avg} = \sum_{k=1}^{24} P_{Gk} / 24 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{Gk}$ 为 $k$ 时段区域电网基础负荷功率; $P_{Ek}$ 为 $k$ 时段分散式电动汽车的功率(充电为正值,放电为负值); $P_{avg}$ 为一天内电网的平均负荷功率。

#### (2) 用户充电成本最优

以用户充电成本最小为目标<sup>[13]</sup>,其目标函数为

在保证用户充电费用不增加的基础上,获得最大化电力奖励积分

$$F_2 = \min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p_j Q_{ij} - (k \cdot r_j W_{ij} - \lambda W_{ij}) \quad (3)$$

式中: $p_j$ 为第 $j$ 个时段电价; $Q_{ij}$ 为第 $i$ 辆电动汽车在第 $j$ 个时段的充电电量; $k$ 为积分兑换电费的兑换率; $r_j$ 为第 $j$ 个时段的单位上网电量的积分补贴系数; $W_{ij}$ 为第 $i$ 辆电动汽车在第 $j$ 个时段的放电电量; $\lambda$ 为电动汽车单位放电量的固有成本系数。

#### (3) 综合目标函数

$F_1$ 和 $F_2$ 量纲不同,需采用线性加权法对目标函数归一化处理,多目标优化综合目标函数为

$$\min F = \lambda_1 \frac{F_1}{F_{1\max}} + \lambda_2 \frac{F_2}{F_{2\max}} \quad (4)$$

式中: $F$ 为多目标优化综合目标函数; $F_{1\max}$ 、 $F_{2\max}$ 为式(2)和式(3)单目标函数最大值; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 为权系数,其数值以保证2个目标函数同时收敛为目的,通过多次计算获得,且满足 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

### 2.2 调控模型约束条件

#### (1) 电网约束

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) < P_{\text{调度}}(t) \quad (5)$$

式中: $P_i(t)$ 为 $t$ 时刻 $i$ 辆电动汽车的调控充/放电功率; $P_{\text{调度}}(t)$ 为 $t$ 时刻电网调度部门对该区域的调控指标。

#### (2) 电动汽车本体约束

##### • 充电功率约束

$$P_{ij\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij\max} \quad (6)$$

$$P_{ij\max} = \min(P_{ij-v\max}, P_{ij-c\max}, P_{ij-l\max}) \quad (7)$$

式中: $P_{ij}$ 为 $j$ 个时段第 $i$ 辆EV充/放电功率; $P_{ij\min}$ 为 $j$ 个时段第 $i$ 辆EV最小充/放电功率; $P_{ij\max}$ 为 $j$ 个时段第 $i$ 辆EV最大充/放电功率; $P_{ij-v\max}$ 为 $j$ 个时段第 $i$ 辆电动汽车需要承受的最大充电功率; $P_{ij-c\max}$ 为第 $j$ 个时段充电装置提供的最大充电功率; $P_{ij-l\max}$ 为第 $j$ 个时段第 $i$ 辆电动汽车所在供电线路的输电能力。

##### • 电池充电电量约束

$$20\%Q_{ei} \leq Q_{ij} \leq 100\%Q_{ei} \quad (8)$$

$$Q_{ij} = P_{ij} \cdot \Delta t + Q_{ij}(\text{initial}) \quad (9)$$

式中: $\Delta t$ 为第 $i$ 辆电动汽车总的充电时间; $Q_{ei}$ 为第 $i$ 辆电动汽车电池额定充电容量。另外,由于电动汽车正常使用时其电池荷电状态(SOC)一般需保持在20%~100%之间,式(9)中充电电量约束也应保持在20%~100%的额定充电容量之间。

#### (3) 用户行为约束

用户受限于当日的特殊行驶需求,可以选择参与或不参与电网调控,并且设定电动汽车最小放电量 and 最大充电量,满足在参与电网调控的同时,不影响出行。

- 主观需求约束

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{电动汽车参与调控} \\ 0 & \text{电动汽车不参与调控} \end{cases} \quad (10)$$

- 特殊电量约束

$$\begin{aligned} Q_{\min \text{ set}} &\leq Q_{ij} \text{ (放电的电量约束)} \\ Q_{ij} &\leq Q_{\max \text{ set}} \text{ (充电的电量约束)} \end{aligned} \quad (11)$$

### 3 仿真模型

#### 3.1 仿真场景及条件假设

以南京市配网某馈线为例,包括一商业综合体,一高层居民小区,及一综合写字楼。假设其中居民小区电动汽车渗透率为70%,即约有500个分散式充电桩,商业综合体每天约800辆电动汽车,而综合写字楼约1200辆电动汽车,分析分散式充电桩参与负荷优化效果。未接入电动汽车时,各用户主体及馈线夏季典型负荷曲线如图1所示。

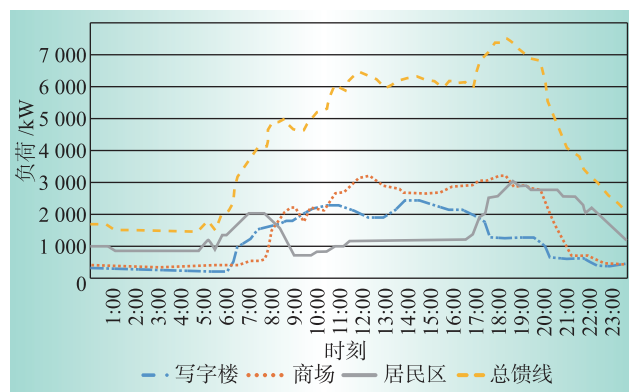


图1 电网基础负荷曲线(无电动汽车接入)

南京市电动汽车充电政策为:工商分散式充换电设施按其所在场所执行分类目录电价;商建营业性分散式充电桩执行大工业用电价格,2020年前免收基本电费;居民小区按居民电价征收并免收服务费;电动汽车充换电设施用电执行峰谷分时电价政策。江苏近两年针对夏季尖峰负荷,面向工商业用户实施了尖峰电价和可中断负荷闭环补贴机制,并以电力奖励积分机制形式奖励参与用户,各时段电价及奖励积分政策见表1。

#### 3.2 初始已知条件

- (1) 电动汽车接入的时间概率分布

电动汽车接入电网充电的时间与车主的工作生活规律基本一致,如图1所示。采样数据显示充电主要集中在7:30~9:00,其中在8:15左右达到最高峰,整个充电开始时间基本服从均值为8.25、标准差为0.25的正态分布<sup>[14]</sup>。

来自用户居民小区的采样数据显示,受居民回家时间和居民谷电价的影响,电动汽车充电接入时间相对分散,平均分布在17:00~23:00,整个充电开始

表1 南京市夏季电动汽车充电电价和奖励积分

| 位置 | 时段          | 类别 | 充电电价/<br>(元·kWh <sup>-1</sup> ) | 奖励积分/<br>(分·kWh <sup>-1</sup> ) |
|----|-------------|----|---------------------------------|---------------------------------|
| 商业 | 9:00~10:30  | 峰  | 1.369 3                         |                                 |
|    | 10:30~11:30 | 尖  | 1.469 3                         | 11(放电)                          |
|    | 11:30~12:00 | 峰  | 1.369 3                         |                                 |
|    | 12:00~13:30 | 平  | 0.821 6                         |                                 |
|    | 13:30~14:30 | 尖  | 0.908 4                         | 11(放电)                          |
|    | 14:30~17:00 | 平  | 0.821 6                         |                                 |
|    | 17:00~18:30 | 峰  | 1.369 3                         |                                 |
|    | 18:30~19:30 | 尖  | 1.469 3                         | 11(放电)                          |
|    | 19:30~22:00 | 峰  | 1.369 3                         |                                 |
|    | 22:00~23:00 | 平  | 0.821 6                         |                                 |
| 居民 | 23:00~8:00  | 谷  | 0.373 9                         |                                 |
|    | 8:00~9:00   | 平  | 0.821 6                         |                                 |
|    | 0:00~2:00   | 谷  | 0.358 3                         | 0.2(充电)                         |
|    | 2:00~4:00   | 谷  | 0.358 3                         | 0.22(充电)                        |
|    | 4:00~7:00   | 谷  | 0.358 3                         | 0.25(充电)                        |
|    | 8:00~22:00  | 峰  | 0.578 3                         |                                 |
|    | 22:00~0:00  | 谷  | 0.358 3                         |                                 |

时间基本服从均值为19.5、标准差为1.2的正态分布

$$f_{\text{t}}(x) = \begin{cases} 0.2 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{L1}}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_{\text{L1}})^2}{2\sigma_{\text{L1}}^2}\right) & x \in (7, 10) \\ 0.8 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{L2}}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_{\text{L2}})^2}{2\sigma_{\text{L2}}^2}\right) & x \in (17.5, 22.5) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $x$ 为一天内的时间序列变量, $h$ ;  $\mu_{\text{L1}}$ 、 $\mu_{\text{L2}}$ 为各段正态分布均值;  $\sigma_{\text{L1}}$ 、 $\sigma_{\text{L2}}$ 为各段标准差。具体取值如下:  $\mu_{\text{L1}} = 8.25, \sigma_{\text{L1}} = 0.25$ ;  $\mu_{\text{L2}} = 19.5, \sigma_{\text{L2}} = 1.2$ 。

- (2) 电动汽车接入的初始电量概率分布

利用样本统计分析电动汽车在各个时刻的SOC状态,近似地符合:  $u = 0.5$ ,  $r = 0.1$  高斯分布函数

$$SOC(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{L2}}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_{\text{L2}})^2}{2\sigma_{\text{L2}}^2}\right) \quad x \in (0, 1) \quad (13)$$

#### 3.3 优化模型参数分析

- (1) 优化目标权值确定

优化目标权值采用熵权法进行客观赋权,但在实际仿真算例中,结合优化场景的目标偏向,进行主观规定权法辅助确定。

熵权法是利用指标信息熵值,确定指标在综合评价过程中的权重大小。指标熵越小,则该指标变异程度越大,信息量越大,在评价指标体系中该指标起的作用越大,权重越大。第 $j$ 个指标的信息熵值 $e_j$ 为

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m F_{ij} \ln F_{ij} \quad (14)$$

式中:  $j=1$  为负荷波动指标;  $j=2$  为用户成本指标。

第  $j$  个指标的熵权  $w_j$  为

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (15)$$

根据 3.1 节仿真场景中确定的电价和奖励政策,将确定的电网基础负荷信息分别代入式(14)、式(15)计算,最终确定  $\lambda_1 = 0.42$ ,  $\lambda_2 = 0.58$ ,权重偏向用户以调动用户参与优化的积极性。

#### (2) 优化模型约束值

电网约束需要兼顾调度指令,当前电网调度主要确保电网安全运行,调度容量相对保守,对于本文研究的负荷波动优化而言,调度容量小于优化容量。算例中,负荷优化的目标容量,尖峰时刻负荷率降低 10%~25%,负荷率保持在 75%~85%,在保证电网安全运行的同时,经济性最高。而低谷时刻,则更多是在兼顾用户成本优化的同时,将负荷率在低谷时段整体提升 5%~10%。

电动汽车本体约束,主要是功率约束和容量约束,家用电动汽车充电功率约为 3.5~7 kW,整个充电过程约 5~8 h,因此算例中功率采用 5 kW,容量约束为 20%~80%。此外假设用户只有在剩余电量小于 80% 时才会充电,并且每次充电时间不小于 2 h。

### 3.4 优化仿真计算过程

采用 MATLAB 软件仿真工具,进行建模及仿真计算<sup>[15-16]</sup>。

(1) 优化仿真的数据需求准备。包括电网的调控指令,用户历史负荷曲线、调控日基线预测、EV 历史充电曲线、调控日充电基线预测、EV 桩的初始数据及用户的初始设定。

(2) 编写负荷优化的目标函数。包括负荷波动率优化、用户成本函数优化,并根据调控偏好,设定两者权值。

(3) 编写约束条件。包括电网运行约束、上级电网的调控约束、车桩本体约束及用户行为需求约束等。

(4) 利用 MATLAB 软件中的多种群粒子群优化算法进行计算,该方法是将专家知识与 PSO 算法相结合减少优化目标。

(5) 优化结果收敛判断。若无法收敛,则返回修改必要的约束条件;若可以收敛,则判断优化结果是否满足要求。若电网负荷波动及用户充电成本均满足要求,则计算结束,输出各 EV 的最终充放电功率和时段安排,否则返回目标函数调整权值,再次计算。

## 4 仿真结果分析

对 3 类用户在大规模电动汽车随机接入后的负荷曲线进行仿真计算,各用户优化前后的负荷曲线对比如图 3—图 5,可见电动汽车自发接入的充电高

峰负荷与 3 类用户的基础电力负荷均一致,会进一步加大用户的高峰负荷,拉大峰谷差。图 6 为馈线总体负荷优化前后对比。

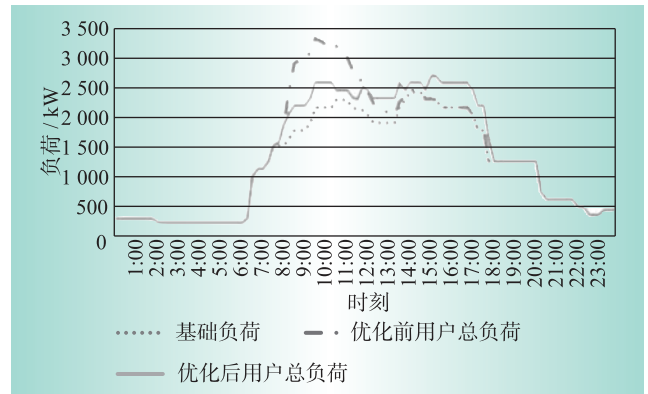


图3 写字楼负荷优化前后对比

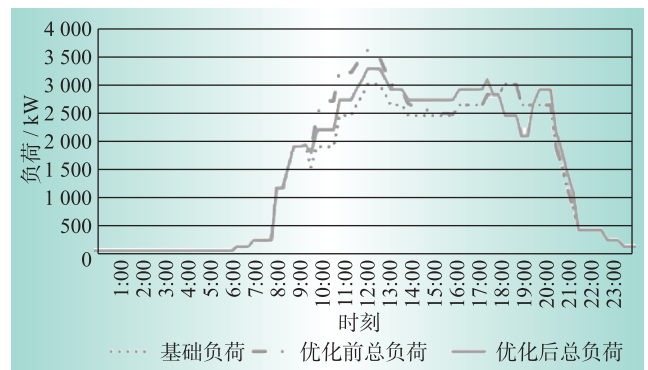


图4 商场负荷优化前后对比

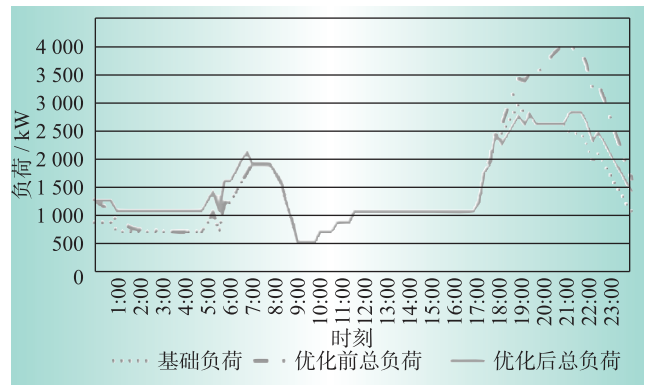


图5 居民小区负荷优化前后对比

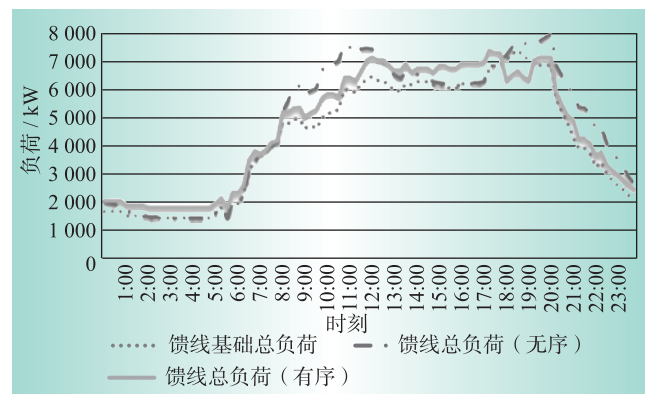


图6 馈线总体负荷优化前后对比

写字楼的尖峰负荷与电网的早、午尖峰负荷一致,该类用户的电动汽车在尖峰时刻可分2批次放电参与优化调峰。优化后,峰谷差由3 083 kW降到2 463 kW,负荷波动率由0.865降低到0.802,充电成本节约6 115元,其中充电电费减少484元,尖峰补贴5 632元。

商场负荷由于营业时间的因素,其第一高峰负荷处在平荷阶段,但第二个高峰负荷与电网的晚高峰负荷一致,可放电参与优化调峰。优化后峰谷差由3 484 kW降到3 165 kW,负荷波动率由0.912降低到0.884,充电成本节约8 064元,其中充电电费减少639元,尖峰补贴7 245元。

居民电动汽车随机接入时会极大拉高晚峰负荷,且该条馈线的晚峰负荷为一天的最高峰负荷,分布到谷时。优化后峰谷差由3 448 kW降到2 260 kW,居民小区的负荷波动率由0.69降低到0.42,用户充电成本节约3 520元,其中充电电费减少288元,尖峰补贴2 750元,低谷补贴483元。

通过比较3类用户的优化前后对比可见,写字楼和商场对负荷波动优化的提升量较小,但峰谷差优化可观;居民负荷的峰谷差及整体波动率优化效果显著。对于用户成本收益,本次算例借鉴江苏的试点,尖峰补贴较高,所以用户成本节约效益显著。总馈线的峰谷差由6 534 kW降到5 592 kW,负荷波动率由0.547下降到0.492。用户充电电费成本节约17 699元,其中充电电费减少约1 411元,尖峰补贴15 627元,低谷补贴483元。

此外,电动汽车功率约束和容量约束影响了电动汽车充放电分布曲线,主要影响正太分布的标准差分布。充放电功率越大,标准差越小,曲线越陡峭;反之,标准差越大,曲线越平稳。充电时间越长,标准差越大,曲线越平稳。在优化调控期间,功率调控范围和容量约束区间与负荷调控效果成正比关系,功率越大、容量约束区间越大,负荷波动调控越优,用户成本优化越显著。

## 5 结论

本文在确定负荷波动评估指标基础之上,重点构建了分散式充电桩参与电网负荷优化的多目标优化模型,该模型提取负荷波动率的关键特征,建立简洁但足以表征负荷波动率的优化目标函数;又引入电力奖励积分解决电价不灵活的问题,构建用户成本优化目标函数;同时从电网运行,EV的车、桩本体及用户行为约束来完善优化模型的约束条件。然后以南京市新街口地区(包括写字楼、商场和居民区)某配网馈线的典型夏季负荷为例,进行2 000辆参与日调峰汽车、500辆参与夜填谷汽车的负荷优化分析,利用MATLAB软件及多种群粒子群算法进行仿真计算。结果显示写字楼和商场对于负荷波

动优化的提升量相对较小,但峰谷差优化可观;居民负荷无论是峰谷差还是整体波动率优化效果均显著,充电成本优化效益可观。仿真模型和仿真结果可为分散式充电桩调控工程的推广和实践提供技术支撑和数据参考。D

## 参考文献:

- [1] 吴俊宏,储真荣.电动汽车参与电网调峰的可行性探讨[C].南京:中国电机工程学会,2016:104-109.
- [2] 潘巍,刘瑜俊,徐青山,等.电动汽车与电网互动协调控制策略研究综述[J].电力需求侧管理,2013,15(4):6-10.
- [3] 李文华,许晓杰.电动汽车随机充电对主动配电网的影响研究[J].电器与能效管理技术,2016(7):39-42.
- [4] 杨洪明,黄雨翔,刘保平,等.考虑分布式电动汽车参与电网调峰的配电网规划[J].电力科学与技术学报,2012,27(1):48-53.
- [5] 任思源,李思齐.可达性分析在北京电动汽车充电桩设施布局上的应用[J].供用电,2018,35(5):75-78.
- [6] 施泉生,平宗飞,陈敏骏.计及电动汽车入网的电价联动模型[J].电力自动化设备,2014,34(11):34-39.
- [7] 项顶,宋永华,胡泽春,等.电动汽车参与V2G的最优峰谷电价研究[J].中国电机工程学报,2013,33(31):15-22.
- [8] 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.
- [9] 赵明宇,徐石明,高辉,等.基于模糊K-means算法的电动汽车应急供电策略[J].电力系统自动化,2016,40(5):91-95.
- [10] 谢小英,李文军,宣文华.一种平抑光伏和负荷波动的电动汽车有序充放电策略[J].燕山大学学报,2015,39(4):352-356.
- [11] 于浩明,黄纯,张磊,等.基于分时电价机制的电动汽车用户侧有序充放电控制策略[J].中国电力,2014,47(12):95-98.
- [12] 尹积军.支持特高压互联网安全运行的供需友好互动技术研究[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5 715-5 723.
- [13] 范子恺,俞豪君,朱俊澎,等.电力高峰时段电动汽车负荷优化调度[J].电力需求侧管理,2014,16(5):3-9.
- [14] 戴欣,袁越,傅质馨.用户侧电动汽车放电策略及其经济效益评估[J].电力系统及其自动化学报,2013,25(6):55-61.
- [15] 戴诗容,雷霞,程道卫,等.分散式电动汽车入网策略研究[J].电工技术学报,2014,29(8):57-63.
- [16] 冉龙,李小菊,熊飞.大规模电动汽车分散式最优充电控制策略[C].南京:中国电机工程学会,2014:717-726.

(本栏责任编辑 孙晶 水 鹤)