

改善配电网负荷特性的充电站有序充电优化策略

杨玉青, 苏粟, 姜久春, 张维戈, 黄梅, 鲍谚

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 充电站的建设与运营是电动汽车发展的基础性工程。以持续时段内配电网负荷方差最小为优化目标, 以充电站的规模和用户需求为约束条件, 基于粒子群优化算法提出了结合配电网负荷特性的充电站有序充电的动态优化方案。利用概率分布随机模拟的方法模拟用户的运行特征, 对不同渗透率下, 将动态优化的有序充电和到站即充的无序充电二者在负荷特性上进行对比分析。研究表明, 通过动态有序充电优化方案可以降低负荷波动, 优化配网特性, 起到移峰填谷的作用。

关键词: 充电站; 电动汽车; 粒子群算法; 动态优化; 负荷特性

Dynamic optimizing strategy of coordinated charging to improve the load characteristics of distribution system

YANG Yu-qing, SU Su, JIANG Jiu-chun, ZHANG Wei-ge, HUANG Mei, BAO Yan
(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The construction and operation of electric vehicle (EV) charging station is the basic project in the EV industry development. This paper presents a dynamic optimizing method to improve the load characteristics of the distribution system based on the particle swarm optimization (PSO) algorithm. The optimizing strategy is operated by minimizing the load variance for a period as objective function, and the scale of charging station and the demands of customers as constraints. The customers' travel performance is simulated by the stochastic method of probability distribution. And load characteristics of coordinated and uncoordinated charging are compared in different permeability. The conclusion shows that the dynamic optimizing strategy takes effect in mitigating load variance, optimizing distribution system characteristics and shifting peak load.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050211).

Key words: charging station; EV; PSO; dynamic optimization; load characteristic

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0060-07

0 引言

随着世界汽车工业的发展和居民生活水平的提高, 我国汽车保有量迅速增长。与此同时, 世界性能源短缺和环境污染问题也日益突出。而电动汽车作为新一代交通工具, 以其节能、环保的优点, 受到各国政府的广泛关注。世界各国纷纷出台政策, 把电动汽车的发展放到重要的战略地位, 我国也正在大力发展电动汽车产业, 并出台了一系列的发展政策^[1-2]。

然而随着电动汽车的大规模发展和普及, 势必会对配电网产生影响, 特别是造成配电网负荷的峰谷差增大、馈电损耗增加、变压器过载、电压跌落

等负面影响^[3-6]。同时, 大规模电动汽车广泛接入电网, 其使用特性在时间和空间上的移动性和随机性, 使电动汽车负荷很难进行精确建模。

充电站作为电动汽车和电网进行能量交换的媒介, 在运营和调度上, 都对电网和电动汽车用户产生很大的影响。充电站的有序运营是实现大规模电动汽车有序充电的基础。而且, 充电站内电动汽车有序充电对于提高配电网运行的经济性和降低电动汽车负荷对配电网正常运行的不利影响具有重要的意义。

在电动汽车与电网互动方面, 国内外学者已经进行了大量的研究工作。其中, 文献[7]在理论上论证了配电网馈电损耗、负载率和负荷方差三者的关系, 提出了降低网络损耗的有序充电方案, 进一步仿真得出了将负载率和负荷方差作为优化目标的有

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA050211)

序充电方法计算速度更快; 文献[8]提出了时序最优潮流 (Time Coordinated Optimal Power Flow, TCOPF) 的方法, 通过对 PHEV (Plug-in Hybrid EV) 的储能单元进行控制以及改变变压器分接头的操作来进行有序控制; 文献[9]提出在以换电站作为储能系统的区域独立供电系统中, 以经济利益最大化作为目标函数, 得到区域独立供电系统的运营方案; 文献[10]以负荷峰谷差最小为目标函数, 提出利用动态插值的方法进行有序充电控制。文献[11]提出以充电站运营经济最大化为优化目标, 以配电变压器容量和用户需求为约束的有序充电方案。

在上述研究中, 大部分优化过程是离线的。离线运行是指在每天运营之前提前得到有序充电方案。由于实际的充电站运营情况往往不能和预测情况完全一致, 因此离线控制过程一般不够精确, 有必要提出一种在线的实时运营方案。

本文旨在提出一种充电站动态有序充电的优化方法, 以配电网负荷方差最小为优化目标, 以充电站的规模、用户需求等为约束条件, 基于粒子群优化算法建立优化模型, 降低快速充电站对配电网负荷波动造成的不利影响, 在实现电动汽车有序充电控制的同时, 有效改善配电网的负荷特性。

1 动态优化策略与数学模型

1.1 动态优化策略

动态优化策略, 在本文中是指在规定的范围制定有序充电的动态方案。在动态优化过程中, 需要将优化总时长分成若干时间段分别进行优化。时间段分割的越短, 优化越精确, 而精度的提高会极大增加计算量和计算时间。

根据文献[11-12]中对电动汽车运行特性的分析可以看出, 电动汽车的充电负荷主要是由其起始充电时刻和充电时长决定的。本文以每辆车的起始充电时刻作为优化的目标变量, 每辆车的充电时长由车辆起始充电时电池的荷电状态 (State of Charge, SOC) 决定。在有序充电模型中, 通过分时段优化对目标变量进行求解。

1.2 动态优化的目标函数

本文旨在通过分时段优化来减小充电站负荷接入对配电网的影响, 因此将每个时间段的目标函数确定为使得配电网的负荷率最大, 或负荷方差最小^[7,13]。根据文献[7]中的分析和建议, 本文采用使配电网负荷方差最小的方法。在优化中, 常规负荷采用负荷预测的结果, 充电负荷采用充电站实时运行的结果。

$$\text{Min } \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (LD_i^2 - LD_{\text{average}}^2), i=0,1,2,\dots \quad (1)$$

$$LD_i = LD_{\text{grid}-i} + LD_{\text{station}-i} \quad (2)$$

式中: i 表示离散的时间分量, 记为第 i 时刻; n 表示总优化时间, 在优化初始时设定; LD_i 表示第 i 时刻的配电网总负荷, 包括常规负荷和充电站负荷; LD_{average} 表示在时间 n 内, 配电网总负荷的平均值; $LD_{\text{grid}-i}$ 表示第 i 时刻的常规负荷值, 是负荷预测的结果, 不随优化过程而改变; $LD_{\text{station}-i}$ 表示第 i 时刻的充电站负荷, 随优化结果实时变动。其中, 充电站负荷忽略照明等日常负荷。

1.3 动态优化的约束条件

本文中主要以充电站规模、电动汽车用户的需求等为约束条件, 如下:

(1) 要求充电站所在配电网下的总负荷要小于变压器的配电容量。

$$LD_{\text{max}} < S_T \quad (3)$$

式中: LD_{max} 表示配电网总负荷峰值; S_T 表示配电变压器容量。

(2) 要求所有的时间参数符合电动汽车的运行规律。 $T_{\text{in}-j}$ 、 $T_{\text{start}-j}$ 、 $T_{\text{c}-j}$ 、 $T_{\text{wait}-j}$ 和 $T_{\text{out}-j}$ 分别为第 j 辆车进入充电站的时刻、起始充电时刻、充电持续时间、在充电站可以等待的时间以及离开充电站的时刻, 则显然有

$$T_{\text{out}-j} = T_{\text{in}-j} + T_{\text{wait}-j} \quad (4)$$

$$T_{\text{in}-j} \leq T_{\text{start}-j} \leq T_{\text{out}-j} - T_{\text{c}-j} \quad (5)$$

其中, $T_{\text{wait}-j}$ 为用户设定值。

(3) 在充电过程中, 需要保证车辆的充电功率在充电机的功率限制之内。

$$P_{\text{ch-min}} < P_{ji} < P_{\text{ch-max}} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{ch-min}}$ 、 $P_{\text{ch-max}}$ 分别为充电机功率下限和上限; P_{ji} 是第 j 辆车第 i 时刻的瞬时功率。

(4) 优化过程中 SOC 符合以下限制。

$$SOC_{\text{min}} < SOC_{ji} < SOC_{\text{max}} \quad (7)$$

式中: SOC_{ji} 表示第 j 辆车第 i 时刻的 SOC 值; SOC_{min} 、 SOC_{max} 分别表示设定的 SOC 下限和上限; 在本文中 SOC 上限为 100%, 下限为 10%。

(5) 充电站内电动汽车充电为先恒流后恒压模式^[14-15], 如图 1 为不同起始 SOC 条件下的电动汽车充电曲线, 可以看出 5 条充电曲线的充电部分几乎完全重合, 则可以在模型中认为不同起始 SOC 下的充电功率曲线是整条曲线中的一部分。充电功率

曲线可以由起始 SOC 决定。

$$P_{ji} = f(j, i, SOC_{s-j}), T_{start-j} \leq i \leq T_{start-j} + T_{c-j} \quad (8)$$

$$T_{c-j} = g(j, i, SOC_{s-j}) \quad (9)$$

其中, SOC_{s-j} 为第 j 辆车的充电起始 SOC 值。函数 f 和 g 都可以通过图 1 求解。

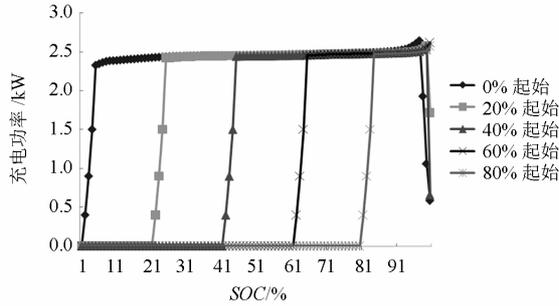


图 1 不同起始 SOC 的充电功率曲线

Fig. 1 Charging performance of various SOC at the charging beginning

2 动态优化控制算法和步骤

2.1 动态循环过程介绍

动态优化的最终优化结果是得到进入充电站的每辆车的起始充电时刻。在本文中以 15 min 作为一个时段。在每个时段更新车辆数, 进入寻优算法, 得到最优结果并更新负荷曲线, 然后进入下一时段的优化, 并对之前的优化结果做出修正, 由此得到仿真总时长的运营方案。

2.2 动态优化的控制算法

动态控制算法是利用粒子群算法作为优化的基本算法, 在每个动态循环中进行调用, 从而完成动态优化过程。

粒子群算法^[16-20]是从鸟类生物种群行为特征中得到启发并用于求解优化问题, 在粒子群算法中, 每个个体称为一个“粒子”, 其实每个粒子代表着一个潜在的解。每个粒子对应一个由适应度函数决定的适应度值。粒子不断调整位置, 实现个体在解空间中寻优。

在每次迭代中, 粒子根据式(10)、式(11)分别更新速度和位置。

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id} - z_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd} - z_{id}^k) \quad (10)$$

$$z_{id}^{k+1} = z_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (11)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$, m 为粒子规模, 本文中取 20; $d=1, 2, \dots, D$, D 表示单个粒子的维度; k 是迭代次数, 本文中 k 取 400, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, 这两个参数是用来保持群体的多样性。

c_1 和 c_2 为学习因子, 为常量, 本文中取值均为 1.494 45。

在每次调用中, 粒子群算法的变量为每辆车的起始充电时刻, 其维度 D 即为参与该时段动态优化的车辆数, 由每时段仿真的随机过程而定。

2.3 动态优化步骤

1) 生成车辆初始参数

每辆车进入充电站后, 车辆基本信息通过监控系统输送到充电站控制中心, 在本文中采用随机模拟的方法生成。主要包括以下几项:

(1) 生成车辆数计数向量: V_{num}

V_{num} 代表每时段进入充电站的车辆数, 根据运营经验, 采用正态分布来生成。 n 为仿真总时长, n_p 表示每时段时长, $n_p=15$ min。则总时段数 $Period$ 为

$$Period = \frac{n}{n_p} \quad (12)$$

(2) 生成车辆等待时间向量: T_{wait}

N 表示规定总时间内进入充电站的总车辆数。

$$N = \sum_{p=1}^{Period} V_{num-p} \quad (13)$$

用 $1 \times N$ 的 T_{wait} 来表示用户在充电站内可等待的时间。

可以看出, 第 j 辆车 T_{in-j} 是通过 V_{num} 中车辆的到达时刻来确定, $T_{start-j}$ 却是由优化算法的结果来确定。 T_{out-j} 由 T_{in-j} 和 T_{wait-j} 共同确定。

(3) 生成剩余 SOC 向量: SOC

用 $1 \times N$ 的 SOC 向量表示每辆车回到充电站时的剩余 SOC 量, 到站剩余 SOC 量将会决定车辆的实际充电功率曲线。

2) 求负荷曲线

由于负荷值是每 15 min 采集一次的, 所以需要进行三次样条插值, 使得曲线精度提高。在本文中, 最终得到的负荷曲线时间精度是 1 min。

3) 更新当前时段可优化的车辆数

每 15 min 更新一次, 读取当前时段进入充电站需要充电的车辆信息, 同时读取上一时段需要进行延迟充电的车辆信息。

4) 粒子群优化

根据优化算法的约束条件, 将电动汽车的初始数据代入粒子群算法中, 以配电网总负荷的负荷方差最小为目标函数, 确定优化后每辆车的起始充电时刻。

每 15 min 更新一次, 得到每辆车的起始充电时

刻, 如果最优结果是在当前时段, 则立即开始充电, 如果优化结果是之后的时段, 则需要延迟充电, 将保留粒子进入下一次优化过程。

5) 负荷叠加, 循环优化

如果确定某车辆在当前时段开始充电, 则其充电负荷就在常规负荷上进行叠加, 更新负荷曲线。

进行下一次循环, 从步骤 2) 开始, 然后读取下一时段内车辆的充电需求, 连同步骤 4) 中的保留粒子一起进行优化, 再次进入步骤 4)、步骤 5)。

2.4 动态优化流程图

按照上述 2.3 节介绍的动态优化算法的主要仿真步骤, 图 2 展现了充电站实际运行时的主要流程。

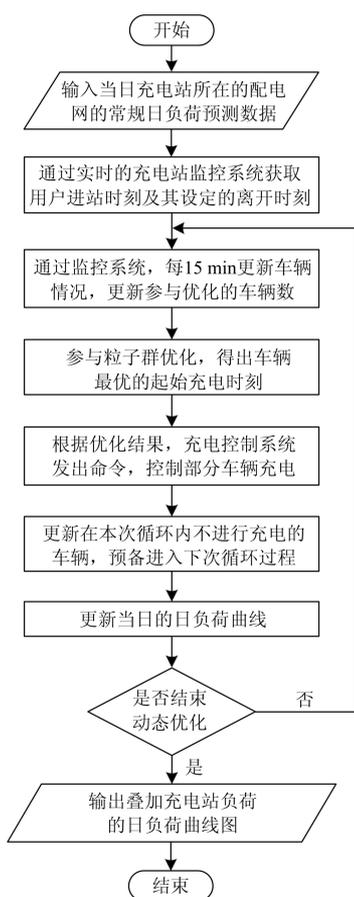


图 2 动态优化充电流程图

Fig. 2 Dynamic optimizing charging flow chart

3 算例分析

假设在配电网内, 某一节点为充电站负荷, 其他节点为常规负荷。本文设置三个算例, 均设置为每 15 min 进行一次循环, 循环次数为 40。利用概率分布特性生成随机数在充电站内进行充电站运营模拟, 假设每时段进入充电站的车辆数、车辆等待时间、回站 SOC 均符合正态分布规律。根据动态

优化算法进行优化运算, 得到每辆车最优的起始充电时刻, 从而可以得到充电站的负荷曲线以及配电网的最终负荷曲线。

3.1 参数设置

以下是利用正态分布生成的模拟电动汽车运营数据:

(1) 每时段进入充电站的车辆数, 三种情况设置略有不同; 其中, 分为三种情况进行模拟。

Case1:

每时段进入充电站的车辆数为 0~3 辆, 按正态分布 $\mu_{num} = 1.5$; $\sigma_{num} = 0.1$ 模拟。

Case2:

每时段进入充电站的车辆数为 3~6 辆, 按正态分布 $\mu_{num} = 4.5$; $\sigma_{num} = 0.1$ 模拟。

Case3:

每时段进入充电站的车辆数为 6~9 辆, 按正态分布 $\mu_{num} = 7.5$; $\sigma_{num} = 0.1$ 模拟。

(2) 每辆车的等待时间按 $\mu_{wait} = 8\text{ h}$, $\sigma_{wait} = 0.1$ 进行模拟。

(3) 每辆车进入充电站时的剩余 SOC 量按 $\mu_{SOC} = 50\%$, $\sigma_{SOC} = 0.1$ 进行模拟。

3.2 无序充电和有序充电结果对比

假设经过动态优化得到的负荷曲线为有序充电曲线, 而按照进入充电站立即开始充电得到的负荷曲线为无序充电曲线。以下为在不同的案例中, 有序充电负荷与无序充电负荷的对比分析。

(1) Case1 补偿结果, 如图 3。

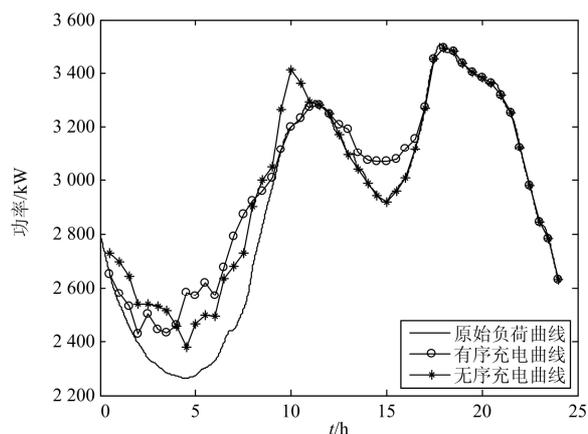


图 3 Case1 有序、无序充电的总负荷

Fig. 3 Total load of coordinated and uncoordinated charging in Case1

充电站负荷与常规负荷的总量对比如表 1 所示, 在只有常规负荷、有序充电、无序充电三种情

况下的负荷特性分析如表 2 所示。

表 1 Case1 充电站负荷与常规负荷总量对比

Table 1 Total load comparison of charging station load and the conventional load in Case1

优化车辆数	常规负荷/kWh	充电站负荷/kWh	EV 渗透率/%
66	69 611	2 159.9	3.10

表 2 Case1 三种情况负荷特性对比

Table 2 Load characteristic comparison of the three modes in Case1

	负荷方差/kW ²	最大负荷/kW	负荷率
常规负荷	159 400	3 511.2	0.826 1
有序	104 380	3 511.2	0.851 4
无序	105 050	3 511.2	0.851 4

从图 3 中可以看出原应出现的充电尖峰被移到了负荷的低谷时段,起到了削峰填谷的作用。从表 1 和表 2 的数据看出,由于车辆数较少,充电负荷叠加后没有对负荷峰值造成影响,但通过负荷方差可以看出有序充电优于无序充电,降低 670 kW²。

(2) Case2 补偿结果,如图 4。

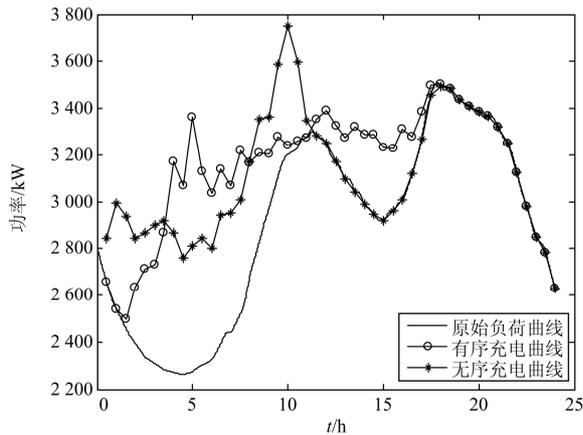


图 4 Case2 有序、无序充电的总负荷

Fig. 4 Total load of coordinated and uncoordinated charging in Case2

充电站负荷与常规负荷的总量对比如表 3 所示,在只有常规负荷、有序充电、无序充电三种情况下的负荷特性分析如表 4 所示。

Case2 中参与优化的车辆数增多,从表 3 也可以看出电动汽车负荷的渗透率增大 5.55%。从表 4 的数据也看出优化过后负荷方差降低 5 492 kW²,最大负荷降低 341.2 kW,负荷率增长 7.81%,综合图 4 和表 2 说明采用动态优化的有序充电方法,合理分配电动汽车的充电负荷,极大改善了负荷特性。

(3) Case3 补偿结果,如图 5。

表 3 Case2 充电站负荷与常规负荷总量对比

Table 3 Total load comparison of charging station load and the conventional load in Case2

优化的车辆数	常规负荷/kWh	充电站负荷/kWh	EV 渗透率/%
186	69 611	6 021.5	8.65

表 4 Case2 三种情况负荷特性对比

Table 4 Load characteristic comparison of the three modes in Case2

	负荷方差/kW ²	最大负荷/kW	负荷率
常规负荷	159 400	3 511.2	0.826 1
有序	63 277	3 539.8	0.889 5
无序	68 769	3 881	0.811 4

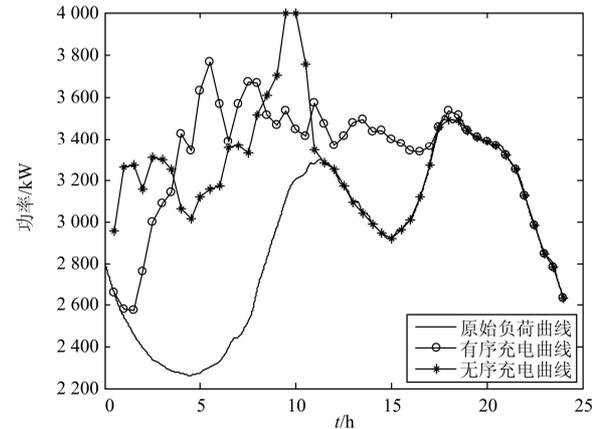


图 5 Case3 有序、无序充电的总负荷

Fig. 5 Total load of coordinated and uncoordinated charging in Case3

充电站负荷与常规负荷的总量对比如表 5 所示,在只有常规负荷、有序充电、无序充电三种情况下的负荷特性分析如表 6 所示。

从图 5 可以看出在渗透率达 14.20%时,电动汽车负荷已经在总负荷中占较大比重,此时无序充电对负荷特性的影响更为严重,动态优化过后,负荷方差降低 3 118 kW²,最大负荷降低 392.8 kW,负荷率增长 7.95%。随着电动汽车负荷渗透率增加,动态优化的有序充电方法的效果就越为明显。

表 5 Case3 充电站负荷与常规负荷总量对比

Table 5 Total load comparison of charging station load and the conventional load in Case3

优化的车辆数	常规负荷/kWh	充电站负荷/kWh	EV 渗透率/%
306	69 611	9 883.8	14.20

表 6 Case3 三种情况负荷特性对比

Table 6 Load characteristic comparison of the three modes in Case3

	负荷方差/kW ²	最大负荷/kW	负荷率
常规负荷	159 400	3 511.2	0.826 1
有序	87 126	3 850.4	0.858 8
无序	90 244	4 243.2	0.779 3

3.3 结果分析

综上算例仿真, 可以得出以下分析结果:

1) 动态有序充电策略对于改善配电网负荷特性, 降低电动汽车充电负荷的不利影响有明显的效果。

2) 动态优化算法相对于离线优化算法其最大的优势在于其实时动态的特点, 离线优化算法不仅需要常规负荷的日前预测, 还需要电动汽车运行状况的日前预测, 而动态优化可以对实时运行在 15 min 内做出快速反应, 提高有序充电控制的时效性和准确性。

4 结论

本文结合配电网的负荷特性以及充电站的实际运营状况, 充分考虑用户的实际使用需求, 以配电网负荷方差最小为优化目标, 以充电站的规模、用户需求等为约束条件, 基于粒子群优化算法建立了改善配电网负荷特性的动态优化的数学模型。

针对不同渗透率下的动态优化方案对于负荷特性的改善情况, 证实了动态优化方案可以移峰填谷, 改善配电网的负荷特性, 实现配网的经济运行; 随着电动汽车渗透率的增加, 改善效果更加明显。

在实际运营中, 还需要根据车辆类型的不同、充电站的运营收益等考虑更多的实际问题^[21-23]。后续计划进一步针对实际问题, 深入研究不同类型车辆的优化充电策略, 例如公交车、私人乘用车以及出租车等。

参考文献

[1] 电动汽车科技发展“十二五”专项规划[R]. 科技部, 2012.

[2] 节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)[R]. 国务院, 2012.

[3] 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 Ci-wei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.

[4] 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 Ze-chun, SONG Yong-hua, XU Zhi-wei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.

[5] 李惠玲, 白晓民. 电动汽车充电对配电网的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 38-43.

LI Hui-ling, BAI Xiao-min. Impacts of electric vehicles charging on distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 38-43.

[6] 王辉, 文福拴, 辛建波. 电动汽车充放电特性及其对配电系统的影响分析[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(5): 17-24.

WANG Hui, WEN Fu-shuan, XIN Jian-bo. Charging and discharging characteristics of electric vehicles as well as their impacts on distribution systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(5): 17-24.

[7] SORTOMME E, HINDI M M, MACPHERSON J. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.

[8] ACHA S, GREEN T C, SHAH N. Effects of optimised plug-in hybrid vehicle charging strategies on electric distribution[C] // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World, April 19-22, 2010: 1-6.

[9] LOMBARDI P, HEUER M, STYCZYNSKI Z. Battery switch station as storage system in an autonomous power system: optimization issue[C] // PES General Meeting, 2010 IEEE, July 25-29, 2010: 1-6.

[10] QIU Yue-hao. Intelligent strategy on coordinated charging of PHEV with TOU price[C] // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2011- Proceedings, 2011.

[11] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 38-43.

XU Zhi-wei, HU Ze-chun, SONG Yong-hua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.

[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 Li-ting, SHI Shuang-long, JIA Zhuo. A statistics

- model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [13] 尤宏亮, 姜欣. 负荷方差特性和配电线路中电能损耗关系研究[J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(2): 13-15.
YOU Hong-liang, JIANG Xin. Research on relationship of load variance characteristics and electric distribution line energy loss[J]. Power Demand Side Management, 2008, 10(2): 13-15.
- [14] 温家鹏. 纯电动汽车用锂离子动力电池优化充电理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WEN Jia-peng. Studies of lithiumion power battery optimization charging theory for pure electric vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [15] 文峰. 纯电动汽车用锂离子电池组管理技术基础问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
WEN Feng. Study on basic issues of the Li-ion battery pack management technology for pure electric vehicles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [16] 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.
- [17] 史峰, 王辉, 郁磊. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [18] 韩海英, 和敬涵, 王小君, 等. 基于改进粒子群算法的电动车参与负荷平抑策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 165-169.
HAN Hai-ying, HE Jing-han, WANG Xiao-jun, et al. An improved particle swarm optimization-based load response strategy with participation of vehicle to grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 165-169.
- [19] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 电动汽车充电负荷空间分配优化算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 269-276.
TIAN Wen-qi, HE Jing-han, JIANG Jiu-chun, et al. Electric vehicle charging load spatial allocation optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 269-276.
- [20] 张学清, 梁军, 张利, 等. 计及风光电源的一种地区电网电动汽车充电调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 28-35.
ZHANG Xue-qing, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Approach for plug-in electric vehicles charging scheduling considering wind and photovoltaic power in Chinese Regional Power Grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 28-35.
- [21] 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(10): 1-5.
GE Shao-yun, 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(10): 1-5.
- [22] 周逢权, 连湛伟, 王晓雷, 等. 电动汽车充电站运营模式探析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 63-66, 71.
ZHOU Feng-quan, LIAN Zhan-wei, WANG Xiao-lei, et al. Discussion on operation mode to the electric vehicle charging station[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 63-66, 71.
- [23] 何永秀, 戴爱英, 罗涛, 等. 智能电网条件下的两阶段电力需求预测模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 167-172.
HE Yong-xiu, DAI Ai-ying, LUO Tao, et al. A two-stage electricity demand forecasting model in the smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 167-172.

收稿日期: 2013-06-13

作者简介:

杨玉青(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车有序充电, 微网能量管理; E-mail: 12121573@bjtu.edu.cn

苏粟(1981-), 女, 副教授, 研究方向为电力系统与自动化, 微网能量管理等;

姜久春(1973-), 男, 教授, 研究方向为电池管理系统, 电力电子, 新能源发电等。