

基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略

佟晶晶, 温俊强, 王丹, 张建华, 刘文霞

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 随着电动汽车渗透率的增加, 电动汽车的无序充电会给区域配电网的运行带来很大压力。为了减小电动汽车负荷对电网的影响, 提出了一种电动汽车智能充电的调度策略。在分时电价的基础上, 将充电成本最小化和负荷方差最小化作为目标函数, 考虑了充电机最大充电功率限制等约束条件, 建立了电动汽车集中充电的多目标优化调度模型。采用了非支配排序遗传算法(NSGA-II)对优化模型进行求解, 通过 Matlab 算例的计算结果验证了该策略的可行性和有效性。分析了不同数量电动汽车和不同时间窗口的取值对优化结果的影响, 并据此给出了相关建议。

关键词: 电动汽车; 充电策略; 分时电价; 多目标优化; 影响分析

Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price

TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the increase of plug-in electric vehicles (PEV), the uncontrolled charging of them may pose a wide pressure on the operation of regional distribution network. In order to reduce adverse impacts of PEVs, an intelligent charging strategy for a cluster of PEVs is proposed. Considering several constraints such as the charger's maximum charging power, a multi-objective optimization scheduling model is proposed with the objectives of minimizing the total charging cost and minimizing load variance basing on time-of-use (TOU) price. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) is adopted to solve the optimization problem, and the MATLAB calculation results prove the feasibility and effectiveness of the proposed strategy. Factors such as the number of PEVs, the TOU price and the length of time-window are also analyzed to further study PEV charging load's characteristics. Some operation advice is also given based on the analysis above.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A109).

Key words: plug-in electric vehicle; charging strategy; time-of-use price; multi-objective optimization; impact analysis

中图分类号: TM614

文章编号: 1674-3415(2016)01-0017-07

0 引言

在化石能源日渐枯竭和环境问题日益凸显的全球大环境下, 电动汽车由于其良好的环境和经济效益而得到国家的大力发展, 电动汽车的数量也在不断增长。高渗透率的电动汽车对于电网来说是不可忽视的负荷, 必须考虑其对电网的影响。大量文献研究表明大量电动汽车的无序充电会对电力系统的安全稳定运行产生不良影响, 包括进一步增大负荷峰值^[1]、减少变压器寿命^[2]、影响电压质量^[3]、增大

网损^[4]等。

针对电动汽车无序充电所带来的这些问题, 基于电动汽车充电负荷可控的特点, 国内外学者对电动汽车的有序智能充电做了大量的研究, 提出了不同的控制策略, 包括基于分时电价的充电控制^[5]、采用李雅普诺夫优化^[6]、双层优化模型^[7]、序列二次规划^[8]和基于模糊数学理论的充电策略^[9]等。不同的充电策略有不同的目标函数, 然而这些目标函数的建立并没有兼顾用户和电网的利益。电动汽车下一时间段的平均 SOC 最大^[10]、车主利益最大^[11]等目标函数完全基于用户的利益。文献[12]建立了以用户充电费用最小和电池起始充电时间最早为控

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划) (2011AA05A109)

制目标的数学模型，也是以用户为利益主体，考虑了用户的经济性和满意度。文献[13]基于日前负荷预测信息建立了 PHEVs 智能充电优化模型，提出了三个目标函数，即：网损最小，功率因数最大，负荷方差最小。文献[14]建立了以持续时段内配电网负荷方差最小为目标函数的单目标优化模型。这些目标函数则只考虑了尽量减少充电负荷对电网的影响，完全以电网为利益主体。而且，现有文献中关于电动汽车集中充电的优化模型所需参数众多，计算复杂，不利于实际应用。

本文在以上研究的基础上，在智能电网电动汽车集中充电的环境下，建立了电动汽车集中充电的多目标优化调度模型，综合考虑了电网和用户的利益，不仅考虑减小电动汽车充电负荷对电网的影响，还降低了用户的充电费用。这种调度模型的物理意义明确、所需参数较少且参数容易获得，在工程实践中具有良好的可操作性。本文在 Matlab 中采用 NSGA-II 这种成熟的多目标优化算法对优化模型进行求解，计算结果验证了所提充电策略的可行性和有效性。最后分析了不同数量电动汽车和不同时间窗口的取值对优化结果的影响，并据此给出了相关运行建议。

1 电动汽车优化充电策略

1.1 电动汽车集中充电模式

随着城市电动汽车数量的增长，配套的充电设施建设必不可少，除了分散的快速充电桩，集中充电设施比如大型充电站、具备充电功能的停车场也是建设的重点。电动汽车集中充电的物理框架被提出并在电动汽车充电策略的研究中得到广泛的应用^[15]。

本文提出的控制策略所适用的电动汽车集中式智能充电站的结构如图 1 所示。在这种充电站结构中，由一个控制器来管理接入充电站的电动汽车集

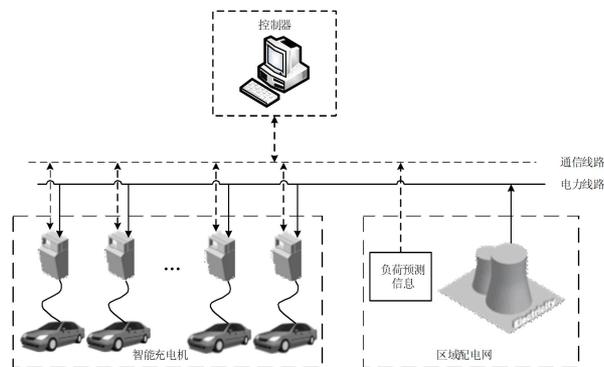


图 1 集中式智能充电结构图

Fig. 1 Structure of centralized intelligent charging

群的充电行为。在智能电网环境下，假设每辆电动汽车一旦驶入充电站，一辆电动汽车对应一台充电机，控制器可以通过充电机检测和记录相应电动汽车的相关信息，包括驶入时间、用户预计离开时间、电池额定容量和现状荷电状态(SOC)等，其中预计离开时间由用户进行选择并将这一信息反馈给控制器，其他参数则由充电机自动检测。控制器还能跟电网交互信息，主要是获取负荷预测信息。控制器在收集到这些信息后经过优化计算，得到每辆电动汽车在每个时间步长的充电功率，并将这些指令发送给电动汽车相连的充电机，由充电机来执行这些指令。

控制器在每个时段开始的时候刷新数据，一旦电网负荷预测值有变化，或者检测到有新的电动汽车接入或离开，控制器就会更新其数据库，做一次优化计算，得到各时段电动汽车的充电安排，然后严格执行这一时段的充电安排。在这个时段结束后再次刷新数据，若这些数据发生了变化了，就根据数据再做一次优化，确定下一时段的充电安排；若这些数据没有变化，则按照上一次的优化结果安排充电。

控制器根据每辆电动汽车的信息计算如果在停车过程中一直不间断地以最大功率充电是否能达到的最大 SOC 水平(最大不超过 95%，考虑到电池过充电的风险)。本文仿真时假设所有电动汽车用户都是以最大 SOC 水平作为目标 SOC 的，若电动汽车停留期间以最大功率持续充电仍不能达到目标 SOC，则不参与调度，始终以最大充电功率充电。需要说明的是，这种框架适用的是停在充电站时间较长的电动汽车集群的智能充电，如上班停在停车场充电的电动汽车，而不是“即等即充”的快速充电站。停车时间较长的电动汽车集群由于充电时间的灵活性而具有调度的可行性，这种电动汽车集群也正是本文所调度的电动汽车。

1.2 优化调度模型

为了综合考虑电动汽车负荷对电网的影响以及充电经济性，本文针对优化充电问题建立了多目标优化模型。采用的两个目标函数是：充电总费用最低和负荷方差最小。大量电动汽车分散无序充电将给电力系统安全稳定运行带来挑战，电网公司作为充电站建设和运营商，以充电费用最小为目标函数充分考虑了电动汽车用户的利益，从而吸引电动汽车用户参与到集中充电的活动中来，即激励用户将电动汽车停在智能控制充电的停车场充电站，电网公司也因此能聚集相当容量的电动汽车从而控制其充电行为，通过以负荷方差最小作为第二个目标函

数, 平抑负荷波动, 有利于电网运行, 从而实现电网和电动汽车用户的双赢。

1.2.1 目标函数

(1) 目标函数 1: 充电总费用最低

在分时电价模式下, 让电动汽车充电总费用最低, 充分考虑了用户的经济性, 同时也是尽可能让电动汽车在电价低的时段(通常也就是电网负荷较低的时段)充电, 从而也可以起到对电网负荷削峰填谷的作用。

该目标函数的公式表达为

$$\min F_1 = \min \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=t}^{t+m-1} C_k \cdot P_{i,k} \cdot \Delta t \right) \quad (1)$$

式中: n 是充电站中接入的电动汽车总数, 即充电站内充电机总数; m 是滚动优化的时间窗口, 包含若干时段; C_k 是在时段 k 的分时电价; $P_{i,k}$ 是第 i 辆电动汽车在时段 k 的充电功率; t 是当前调度所处的时段编号; Δt 是每个时段的时间长度。

(2) 目标函数 2: 总负荷方差最小

第一个目标函数会使大量电动汽车在电网负荷低谷充电, 如果电动汽车在低谷的充电负荷足够大, 则可能会在电网负荷低谷时段形成新的负荷高峰^[5]。为了防止这种情况的发生, 本文提出第二个目标函数: 负荷方差最小。电网负荷叠加上电动汽车充电负荷后的总负荷各时段方差和最小, 即可以平滑负荷曲线, 减小机组的旋转备用容量。而且对实际系统来说, 负荷方差最小化也将会使网损接近最小化^[13]。但是, 以负荷方差最小化作为目标函数比以网损最小作为目标函数更实用, 因为前者在计算时不必进行反复的潮流计算, 而且计算时间也更短, 这一点对于本文中电动汽车充电功率的实时分配问题来说是很重要的。

该目标函数的公式表达为

$$\min F_2 = \frac{1}{m} \sum_{k=t}^{t+m-1} \left[\left(P_{1,k} + \sum_{i=1}^n P_{i,k} \right) - \frac{1}{m} \sum_{s=t}^{t+m-1} \left(P_{1,s} + \sum_{i=1}^n P_{i,s} \right) \right]^2 \quad (2)$$

式中, $P_{1,k}$ 是第 k 个时段电网负荷的预测值。

1.2.2 约束条件

(1) 充电机充电功率约束

$$0 \leq p_{i,k} \leq \eta \cdot P_{\max} \quad (3)$$

式中: P_{\max} 是充电机所能提供的最大充电功率; η 是充电机的充电效率。

(2) 目标 SOC 约束

$$SOC_{i, \text{desire}} \leq SOC_{i, \text{departure}} \leq SOC_{\max} \quad (4)$$

式中: $SOC_{i, \text{desire}}$ 是第 i 辆电动汽车车主希望达到的 SOC 水平; $SOC_{i, \text{departure}}$ 是第 i 辆电动汽车离开时的

实际 SOC 水平; SOC_{\max} 是电动汽车电池的最高 SOC 限制, 不能超过这个数值以防电池过充。

(3) 电池充电爬坡率约束

$$0 \leq SOC_i(k+1) - SOC_i(k) \leq \Delta SOC_{i, \max} \quad (5)$$

式中: $SOC_i(k+1)$ 是第 i 辆电动汽车在 $k+1$ 时段的 SOC 水平, $SOC_i(k)$ 是第 i 辆电动汽车在 k 时段的 SOC 水平; ΔSOC_{\max} 是电动汽车电池爬坡率最大值, 每辆电动汽车充电时的电池爬坡率不能超过电池本身的限制。

在本文优化模型中, 只是将接入系统的一个电动汽车集群当做可控负荷来调度。以后在研究一些问题, 比如再加入别的可控负荷后来研究优化调度问题时, 可以将它们与电动汽车一起用本文提出的目标函数来优化, 只是需要增添那些可控负荷相应的约束条件。

2 优化模型求解方法

本文提出的优化模型是滚动优化的, 每次优化计算都需要对优化模型进行求解, 本文采用了一种成熟的多目标优化算法—NSGA-II来解决这一优化问题。求解整个优化问题的流程图和算法说明如图2所示。

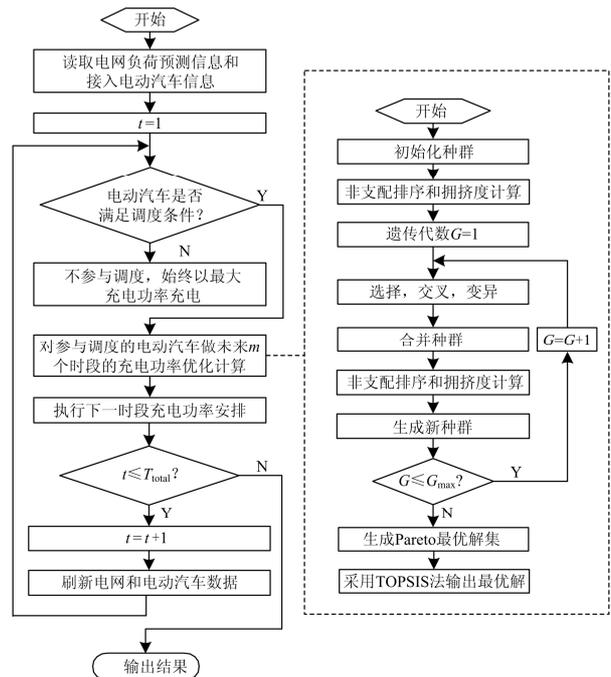


图 2 计算流程图

Fig. 2 Flowchart of calculation

NSGA-II 是在 NSGA 的基础上改进而来的, 主要有三方面的改进: 采用快速非支配排序方法, 降低了算法复杂度; 引入精英策略, 保留优良种群个

体,提高计算准确度;计算拥挤度并采用拥挤度比较算子,从而避免指定共享参数^[16]。用 NSGA-II 来解决多目标优化问题,在迭代终止后得到的一组 Pareto 最优解集,由于本文是滚动优化模型且实时性要求较高,因此需要程序能自动选择最优解。为了实现自动选取最优解的要求,本文采用了基于信息熵的序数偏好法(TOPSIS)^[17]在 Pareto 最优解集中选取充电策略的最优解。TOPSIS 法是一种逼近于理想解的排序方法,常用于多目标决策分析,其基本原理是通过计算评价对象与正、负理想解之间的距离,然后进行排序,排序的规则是把各备选方案与理想解和负理想解做比较,若其中有一个方案最接近理想解,而同时又远离负理想解,则该方案是备选方案中最好的方案。

在使用 TOPSIS 方法时涉及到权重的选取,本文采用文献[17]中的信息熵法来确定各目标值的权重,从而避免了主观确定的权重对排序结果的影响。信息熵法的原理是通过计算 Pareto 解集中各目标值的差异性来确定其权重,目标值的差异性越小,对决策结果的影响越小,其权重就越小。

3 算例分析

3.1 研究对象及基础数据

为验证本文所提策略的可行性和有效性,以某一停车场充电站为例进行计算。电动汽车驶入时间的概率分布曲线是正态分布的,取文献[18]中工作日的电动汽车驶入时间模型。驶入时间的概率密度曲线是均值为9,方差为1.2的正态分布。初始SOC水平设置为0.2~0.6间的连续随机数,停车时间设置为1~8 h之间的随机数^[19]。充电机的充电效率 η 取为0.9,最大充电功率采用Level 2充电方式(即“插电”)的最大功率^[15],该充电方式可以提供7.68 kW的功率,而由于电力电子装置的作用,它所提供的功率也可以低于这个值,即约束条件中的 P_{max} 为7.68 kW。

为了便于计算,本文仿真的每一时段长度设置为1 h,并设定了总时段 $T_{total}=24$,用来分析一天的优化结果。由于电网分时电价的划分可能出现电价为平段却存在负荷小高峰的情况,若采用电网分时电价来引导电动汽车充电,可能导致负荷峰值增大的后果^[12],而且也不利于充电经济性。因此,本文采用的电动汽车分时电价数据及电网分时负荷数据来自于文献[12],其中分时电价数据如表1所示,区域电网日负荷曲线如图3所示。

表 1 分时电价数据

时段	分时电价(元/kWh)
00:00~08:00	0.4
08:00~12:00	2.0
12:00~15:00	1.2
15:00~17:00	2.0
17:00~21:00	2.0
21:00~24:00	1.2

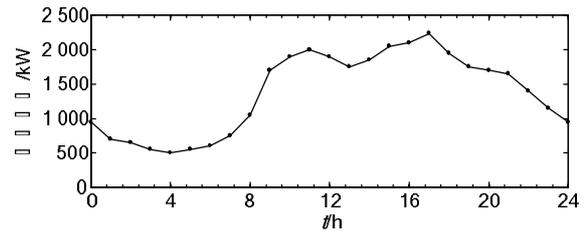


图 3 电网日负荷曲线

Fig. 3 Daily load curve of power grid

3.2 不同数量电动汽车的优化结果分析

使用Matlab编程求解优化模型,NSGA-II算法中参数设置为:种群数量50,最大迭代次数200,交叉率0.8,变异率0.3。电动汽车总数设置为50,滚动优化时间窗口设置为8,图4为使用NSGA-II在某时段进行优化计算时所得到的Pareto前沿。

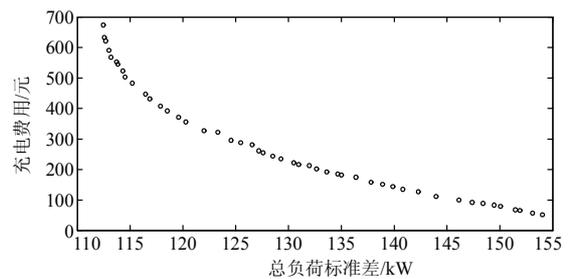


图 4 NSGA-II 计算的 Pareto 前沿

Fig. 4 Pareto front computed by NSGA-II

NSGA-II算法所得到的Pareto前沿分布均匀且稳定,说明了该算法对求解本文多目标优化模型的可行性。Pareto前沿分布图为电动汽车充电成本和总负荷标准差(等效于方差)这两个冲突的目标函数的折衷提供了丰富的决策信息。由图4可知随着总负荷标准差的增大,充电费用会逐渐降低,因为安排在低价时段的电动汽车充电负荷越大,总的充电费用是越低的,但是可能会在低价时段形成负荷小高峰,增大总负荷的波动性,即增大总负荷标准差。为了研究充电策略对不同数量电动汽车充电调度的

效果, 分别对 50、100、200 辆电动汽车进行仿真计算。其中图 5 是 100 辆电动汽车不受控和受控情况下的充电功率分布图, 用来分析充电策略对充电功率安排的影响。需要说明的是, 电动汽车充电不受控情况是指电动汽车一经连接充电机就以最大充电功率进行充电, 直至达到 SOC_{max} 。

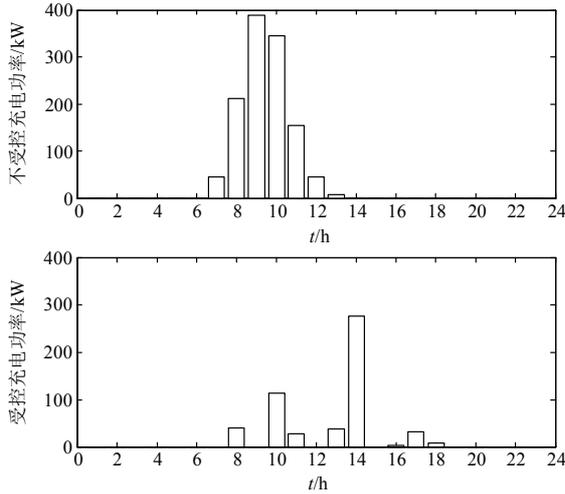


图 5 100 辆电动汽车不受控与受控充电功率分布图
Fig. 5 Charging power distribution diagram of 100 vehicles without and with control

通过比较图 5 中的数据可知, 在采用了智能充电策略后, 有效地减小了电动汽车负荷的峰值, 进而减小了电动汽车负荷对电网的冲击。而且充电策略还使电动汽车负荷能在更长时间内分配, 从而更有效地平滑电网负荷波动。

进一步对三种数量的电动汽车进行受控与不受控两种情况下的数据比较分析, 主要比较电网负荷叠加电动汽车负荷后的总负荷标准差和充电费用, 同时也记录了计算出下一时间段充电安排的仿真计算时间, 以验证该优化模型和求解算法用于实际应用的可行性, 比较结果见表 2。

表 2 充电分时电价下电动汽车优化调度结果
Table 2 Optimized scheduling results of electric vehicles under time-of-use electricity price of charging

车辆数量	控制方式	负荷标准差/kW	充电费用/元	计算时间/s
50	不受控	593.91	1 023.74	44.33
	受控	592.53	593.45	
100	不受控	616.99	2 280.98	44.74
	受控	604.74	823.53	
200	不受控	659.01	4 499.26	45.31
	受控	609.99	1 167.09	

通过比较表 2 中的数据可知: ① 电动汽车无序充电会增大等效负荷的标准差, 即增大电网负荷的波动, 而且随着电动汽车数目的增加, 这种对电网负荷的不利影响更明显, 说明电动汽车无序充电行为会随着电动汽车规模的增大而增大对电网的影响; ② 采取充电策略后, 三种数量电动汽车的调度结果都让总负荷标准差减小, 且调度的电动汽车数目越多, 总负荷标准差减小的幅度越大, 分别降低了 0.23%、1.98%和 7.44%, 说明本文充电策略对于具有一定规模的电动汽车集群来说平滑电网负荷曲线效果明显; ③ 比较不受控和受控两种情况下的充电费用可知, 采取充电策略后三种情况下的充电费用分别降低了 42.03%、63.90%和 74.06%, 说明本文充电策略可以大大减少电动汽车的充电费用, 且参与调度的电动汽车越多, 经济效益越明显; ④ 对三种数目的电动汽车进行优化调度, 计算时间均在 1 min 以内, 说明本文所用算法的计算速度是满足实际运行要求的。

3.3 时间窗口长度对优化结果的影响

为了分析本文优化模型中时间窗口 m 的取值对优化结果的影响, 电动汽车的参数仍然采用表 2 中 100 辆电动汽车的参数, 对 m 分别取值 2~24 进行优化计算, 计算结果如图 6 所示。

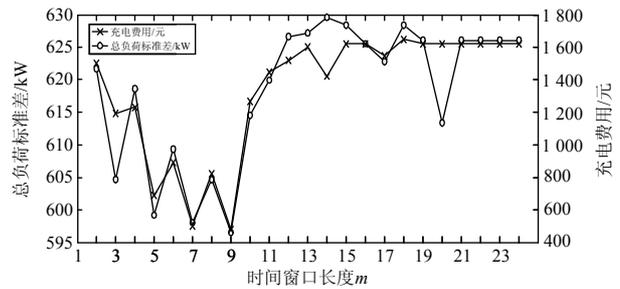


图 6 不同 m 值的优化结果

Fig. 6 Optimization results of different value of m

通过上图可知随着 m 值的变化, 总负荷标准差和充电费用都会发生改变。通过比较不同 m 值下总负荷标准差和充电费用的值, 可知 $m=9$ 时的优化结果是最理想的, 此时两个目标函数值都是最低的。需要说明的是, 若计算最优 m 值时出现了互不支配的解, 即不存在两个目标函数值均为最优的 m 值时, 这组互不支配的解可看做一个 Pareto 解集, 可使用前文优化计算方法中的 TOPSIS 法来选取最优的 m 值。

计算不同 m 值的优化结果的时间共计 6.96 h,

在实际应用中将 m 作为决策变量, 每小时都遍历 m 的值以确定最优 m 值, 显然计算时间不能满足实时调度的要求, 因此, 在实际使用本文优化模型时, 充电站管理人员应该根据统计的电动汽车负荷特性来计算最优 m 值, 将最优 m 值定下来后再进行电动汽车充电功率的滚动优化计算。考虑到电动汽车负荷特性会随着季节、城市发展等因素的影响, 因此最优 m 值的计算也应该定期进行, 如每星期或每月一次等。

4 结论

本文针对电动汽车集群的集中充电优化调度问题, 基于电动汽车充电的分时电价建立了多目标优化的数学模型, 通过研究不同数量电动汽车的优化计算结果, 验证了本文所提优化模型的可行性和有效性。不同时间窗口的选取会对优化结果产生影响, 考虑到计算速度等因素, 在实际应用中调度人员可根据电动汽车负荷特性周期性地(如一星期)计算最优时间窗口值。后续工作可研究控制策略对不同类型电动汽车负荷的优化调度效果, 还可以研究计算速度更快的优化算法, 以更好地满足调度实时性的要求。

参考文献

- [1] 张聪, 许晓慧, 孙海顺, 等. 基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 19-24.
ZHANG Cong, XU Xiaohui, SUN Haishun, et al. Smart charging strategy of large-scale electric vehicles based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 19-24.
- [2] AGAH S M M, ABBASI A. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on residential distribution transformers[C] // Smart Grids (ICSG), 2012 2nd Iranian Conference on: IEEE, 2012: 1-5.
- [3] 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.
- [4] 张明霞, 田立亭, 杨水丽, 等. 考虑电动汽车充电负荷空间分布的系统特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 86-92.
ZHANG Mingxia, TIAN Liting, YANG Shuili, et al. Influence of electric vehicle charging load distribution on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 86-92.
- [5] 孙近文, 万云飞, 郑培文, 等. 基于需求侧管理的电动汽车有序充放电策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 64-69.
SUN Jinwen, WAN Yunfei, ZHENG Peiwen, et al. Coordinated charging and discharging strategy for electric vehicles based on demand side management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 64-69.
- [6] JIN C, SHENG X, GHOSH P. Energy efficient algorithms for Electric Vehicle charging with intermittent renewable energy sources[C] // Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE: IEEE, 2013: 1-5.
- [7] 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.
- [8] HAJIMIRAGHA A, CANIZARES C A, FOWLER M W, et al. Optimal transition to plug-in hybrid electric vehicles in Ontario, Canada, considering the electricity-grid limitations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 690-701.
- [9] 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 Xueqing, 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.
- [10] SU W, CHOW M Y. Performance evaluation of an EDA-based large-scale plug-in hybrid electric vehicle charging algorithm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 308-315.
- [11] HUTSON C, VENAYAGAMOORTHY G K, CORZINE K A. Intelligent scheduling of hybrid and electric vehicle storage capacity in a parking lot for profit maximization in grid power transactions[C] // Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008: IEEE, Atlanta, 2008: 1-8.

- [12] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [13] SORTOMME E, HINDI M M, MACPHERSON S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [14] 杨玉青, 苏粟, 姜久春, 等. 改善配电网负荷特性的充电站有序充电优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 60-66.
YANG Yuqing, SU Su, JIANG Jiuchun, et al. Dynamic optimizing strategy of coordinated charging to improve the load characteristics of distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 60-66.
- [15] SU W, EICHI H, ZENG W, et al. A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(1): 1-10.
- [16] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [17] 吴小刚, 刘宗岐, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 3405-3411.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 3405-3411.
- [18] MA, TAN, OSAMA MOHAMMED. Optimal charging of plug-in electric vehicles for a car park infrastructure[C] // Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE Conference Publications, Las Vegas, 2012: 1-8.
- [19] SU W C, CHOW M Y. Performance evaluation of a PHEV parking station using particle swarm optimization[C] // Power and Energy Society General Meeting, IEEE Conference Publications, Detroit Michigan, 2011: 1-6.

收稿日期: 2015-03-18; 修回日期: 2015-05-14

作者简介:

佟晶晶(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车充电控制、智能电网; E-mail:christine_tong2013@163.com

温俊强(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与运行;

王丹(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为无功电压控制。

(编辑 葛艳娜)