

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181011

基于 V2G 技术的电动汽车实时调度策略

陈凯炎, 牛玉刚

(华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 随着电动汽车逐渐普及, 其对电网的影响也不断扩大。为加强电动汽车与电网间协作, 充分利用电动汽车在电网能量调度中的高度灵活性, 提出一种基于 V2G 技术的电动汽车实时调度策略。首先以降低充电成本和网损成本为目标, 建立电动汽车调度模型。然后通过构建网损灵敏度指标分析电网节点性能, 基于电网负荷制定分时电价, 通过潮流计算和凸优化算法实时求解得到电动汽车充放电策略。最后以 IEEE 33 节点配电网为例验证了所提策略可以有效降低充电成本与网损成本, 同时分析了电动汽车渗透率、V2G 占比对车网协作效果的影响。

关键词: 电动汽车; V2G; 网损; 实时优化

Real-time scheduling strategy of electric vehicle based on vehicle-to-grid application

CHEN Kaiyan, NIU Yugang

(Key Lab of Advanced Control and Optimization for Chemical Process, Ministry of Education, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: As electric vehicles become more popular, their impact on the power grid is also increasing. In order to enhance the cooperation between electric vehicles and power grids and make full use of the high flexibility of electric vehicles in grid energy dispatching, this paper proposes a real-time dispatching strategy for electric vehicles based on V2G technology. To reduce the cost of charging and power loss, an electric vehicle scheduling model is established. Then, the grid node performance is analyzed by constructing the network loss sensitivity index, and the time-of-use electricity price is determined based on the grid load. Finally, the power flow calculation and convex optimization algorithm are used to solve the electric vehicle charging and discharging optimal strategy in real time. The proposed strategy is verified by IEEE 33-node distribution system, and the influence of electric vehicle penetration and V2G ratio on the cooperation between electric vehicle and grid is analyzed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61673174).

Key words: electric vehicle; vehicle to grid; power loss; real-time optimization

0 引言

电动汽车(Electric Vehicle, EV)作为一种使用清洁能源、零排放的新型交通工具, 在近年来得到广泛使用。随着电动汽车在电力系统中的渗透率逐步升高, 其对电力系统的影响力也日益增大。自然状态下电动汽车的充放电行为具有较大的盲目性和随机性, 难以实现个体与电网的协作。根据电动汽车相关统计, 电动汽车入网时间分布与电网负荷变化规律大致吻合, 即在峰值时刻充电需求大, 非峰值时刻充电需求小。因此电动汽车无序充电极易加剧

负荷峰谷差, 使电网承担更大的压力。大量电动汽车的无协作充电则可能对电网整体稳定性产生不利影响, 造成额外的经济损失^[1-3]。

电动汽车具有其他负荷类型所不具备的灵活性和可调度性。此外, 部分电动汽车具有电池电量回馈电网(Vehicle-to-Grid, V2G)的能力, 即该类电动汽车既视为负荷, 也可视为储能电池^[4-5]。若通过合理的调度策略充分利用 V2G 技术, 对电动汽车充放电行为进行规划, 加强车车、车网之间的协作, 不仅可以进一步降低电动汽车充电成本和网损成本, 还可以达到服务电网, 改善电网负荷曲线的效果^[6-7]。

为对电动汽车进行有序控制, 文献[8]提出了一种集中式算法, 使电动汽车在保证电网稳定的前提

下最大化充电速率, 结果表明有序充电下能量利用率和负荷曲线均有改善; 文献[9]以充电站运营商购电成本最小为目标, 提出了电动汽车分时充电价格的制定方法, 实现智能电网中充电负荷的友好接入; 文献[10]提出模糊化的电动汽车充电网络规划模型, 采用遗传算法对电动汽车充电进行多目标优化。这些研究表明电动汽车有序充电可以同时兼顾多个目标, 效果显著。但未考虑电动汽车能量回馈电网, 仅将电动汽车视作一种高度灵活的负荷。

为加强电动汽车与电网的双向协作, 文献[11]基于电力市场模型阐述了具有充放电能力的电动汽车对负荷调度、能源成本的影响; 文献[12]在满足电网功率限制条件下提出了考虑用户因素的电动汽车充放电控制策略, 使运营商和用户均获益; 文献[13]通过对发电量和负载统计建模进行日前优化, 使包含电动汽车负荷的日负荷曲线更好地跟踪发电曲线。这些研究强调利用 V2G 技术, 但未在调度中充分考虑网损等与电网密切相关的评价指标, 其调度策略缺乏实际性。

基于上述分析, 本文提出了一种结合电网模型的电动汽车实时调度策略, 对大规模电动汽车进行有序控制。充分考虑电动汽车与电网的协作能力, 通过构建网损灵敏度指标分析节点性能, 将电动汽车充放电行为与网损成本结合, 基于潮流计算和凸优化算法进行实时规划, 在保证按时完成充电任务的前提下充分利用电动汽车 V2G 功能降低充电成本和电网的网损成本, 同时具有改善电网负荷波动、提升电网稳定性的效果。

1 电动汽车调度模型

电动汽车调度策略由调度中心制定并执行^[14]。调度中心是一个负责实现区域内电动汽车与电网协作的信息中心, 具有采集、发布信息和计算的能力。电动汽车入网后就需要接受调度中心的集中调度。如图 1 所示, 在用户将电动汽车接入电网后, 用户需要为其车辆设定离网时间和目标电量, 并将这些信息与电动汽车的初始电量等数据上传到调度中心。在接入电网的时间内, 电动汽车处于可调度状态, 其充放电行为受调度中心控制。调度中心在保证按时完成所有车辆充电任务的前提下制定充放电调度策略, 并在电动汽车达到离网时间时将其切出电网。

调度中心的调度循环周期为一天, 划分为 T 个单位长度为 τ 的时间段。调度中心在每个时间段的开始时刻更新所有入网电动汽车的数据。由电动汽

车入网时提交的信息可以得到式(1)。

$$H_i^{\text{opt}} = t_i^{\text{off}} - t_i^{\text{in}} \quad (1)$$

其中: H_i^{opt} 为第 i 辆电动汽车的可调度时间; t_i^{in} 为入网时间; t_i^{off} 为用户设定的目标离网时间。

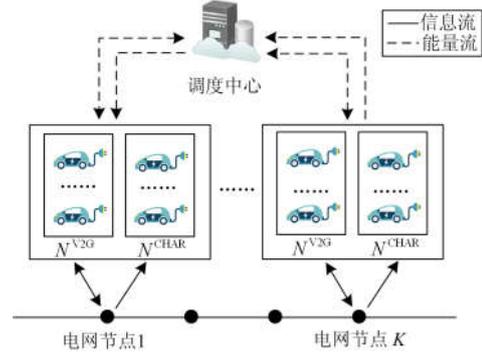


图 1 电动汽车调度模型

Fig. 1 Electric vehicle scheduling model

接入电网的 N 辆电动汽车中只有一部分支持 V2G, 记为 N^{V2G} ; 剩余车辆只支持充电, 记为 N^{CHAR} 。支持 V2G 的车辆比例为 γ , 即

$$N^{\text{V2G}} = \gamma N \quad (2)$$

电动汽车在一个调度循环周期内的充放电规划用一个 $N \times T$ 的矩阵 \mathbf{X} 表示。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,T} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,T} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $x_{i,t}$ 为第 i 辆电动汽车在时间段 t 内的充放电功率(kW), $x_{i,t} > 0$ 表示充电, $x_{i,t} < 0$ 表示放电。

对于属于 N^{V2G} 和 N^{CHAR} 的车辆, 分别满足:

$$0 < x_{i,t} < P^{\text{char}} \quad \forall i \in N^{\text{CHAR}}, \forall t \in T \quad (4)$$

$$P^{\text{dis}} < x_{i,t} < P^{\text{char}} \quad \forall i \in N^{\text{V2G}}, \forall t \in T \quad (5)$$

其中: P^{char} 为最大充电功率; P^{dis} 为最大放电功率。

电动汽车入网时刻初始电量 E_i^{in} (kWh) 为

$$E_i^{\text{in}} = E_i^{\text{cap}} \text{SOC}_i \quad (6)$$

其中: E_i^{cap} 为电动汽车电池最大容量; SOC_i 为入网时刻电池的初始荷电状态。

用户为电动汽车设定的目标电量为 E_i^{off} , 则离网时电池电量满足:

$$E_i^{\text{in}} + \sum_{t=t_i^{\text{in}}}^{t_i^{\text{off}}} \tau x_{i,t} \geq E_i^{\text{off}} \quad \forall i \in N \quad (7)$$

同时, 电池电量在可调度时间内的任意时刻均满足:

$$0 \leq E_i^{\text{in}} + \sum_{t=t_i^{\text{in}}}^{t_q} \tau x_{i,t} \leq E_i^{\text{cap}} \quad (8)$$

$$\forall i \in N, \forall t_q \in [t_i^{\text{in}}, t_i^{\text{of}}]$$

1.1 成本分析

1) 充电成本

充电成本表现为调度中心与电网进行一系列电量交换后的综合购电成本。在各个时间段内, 不同的电动汽车具有不同的充放电行为。假设在单位时间段内充放电行为保持不变, 则入网电动汽车的综合负荷 L_t^{EV} 为

$$L_t^{\text{EV}} = \sum_{i=1}^N x_{i,t} \quad (9)$$

不包含电动汽车在内的其他用电设备构成的基础负荷为 L_t^{base} 。同样假设在单位时间段内基础负荷保持不变, 则总负荷 z_t 为

$$z_t = L_t^{\text{base}} + L_t^{\text{EV}} \quad (10)$$

系统实时电价关于每个时间段内的总负荷线性变化, 即:

$$g(z_t) = k_0 + k_1 z_t \quad (11)$$

其中, $g(z_t)$ 为时间段 t 内的电价。电动汽车的充电成本为

$$C_t^{\text{char}} = \int_{L_t^{\text{base}}}^{z_t} g(z_t) dz = k_0(z_t - L_t^{\text{base}}) + \frac{k_1}{2}(z_t^2 - L_t^{\text{base}2}) \quad (12)$$

电动汽车充电总成本为

$$C_1 = \sum_{t=1}^T C_t^{\text{char}} \quad (13)$$

2) 网损成本

电动汽车接入电网节点后, 以节点注入功率的形式对电网产生影响。在电网实际运行中, 网损是造成的经济损失的一大来源。对含有 M 条支路的电网进行潮流计算, 支路的有功损耗为

$$P_{t,m}^{\text{loss}} = R_m (|V_{ml} - V_{mr}| |Y_m|)^2 \quad (14)$$

其中: $P_{t,m}^{\text{loss}}$ 为时间段 t 内第 m 条支路有功损耗; R_m , V_{ml} , V_{mr} 和 Y_m 分别为该支路的电阻, 两端节点电压和导纳。

时间段 t 内的网损成本为

$$P_t^{\text{loss}} = \sum_{m=1}^M P_{t,m}^{\text{loss}} \quad (15)$$

则网损总成本为

$$C_2 = \sum_{t=1}^T k_2 P_t^{\text{loss}} \quad (16)$$

其中, k_2 为网损成本折算系数。

3) 总成本

一个调度循环周期内所有电动汽车完成充电任务的总成本为

$$C = C_1 + C_2 \quad (17)$$

1.2 问题描述

本文目标为在保证完成电动汽车充放电任务的前提下, 使总成本最小。则优化问题表述如下:

$$\min_X \{J_1 + J_2\} = \sum_{t=1}^T C_t^{\text{char}} + \sum_{t=1}^T k_2 P_t^{\text{loss}} \quad (18)$$

subject to:

$$z_t = L_t^{\text{base}} + \sum_{i=1}^N x_{i,t} \quad (19)$$

$$E_i^{\text{in}} + \sum_{t=t_i^{\text{in}}}^{t_i^{\text{of}}} \tau x_{i,t} \geq E_i^{\text{of}} \quad \forall i \in N \quad (20)$$

$$0 \leq E_i^{\text{in}} + \sum_{t=t_i^{\text{in}}}^{t_q} \tau x_{i,t} \leq E_i^{\text{cap}} \quad (21)$$

$$\forall i \in N, \forall t_q \in [t_i^{\text{in}}, t_i^{\text{of}}]$$

$$0 < x_{i,t} < P^{\text{char}} \quad \forall i \in N^{\text{CHAR}}, \forall t \in T \quad (22)$$

$$P^{\text{dis}} < x_{i,t} < P^{\text{char}} \quad \forall i \in N^{\text{V2G}}, \forall t \in T \quad (23)$$

2 电动汽车实时调度策略

2.1 实时算法的优化范围

全局算法得到最优调度策略的前提是准确的电动汽车全天预测数据。而电动汽车入网时间、初始状态具有较大的随机性, 不宜使用全局算法^[15]。本文采用的实时调度策略不需要电动汽车全天预测信息, 而是对每个时间段内处于可调度状态的电动汽车进行实时优化, 得到针对当前时间段的最优调度方案。

调度中心在每个时间段的开始时刻计算得到调度策略后发布至电动汽车。记时间段 t 的可调度车辆总数为 N' , 则其可分为两类: 一类为已经入网一定时长的电动汽车, 即 $t_i^{\text{in}} < t < t_i^{\text{of}}$; 一类为在该时间段入网的电动汽车, 即 $t_i^{\text{in}} = t$ 。记它们的剩余可调度时间为 H_i^{left} , 有:

$$H_i^{\text{left}} = t_i^{\text{of}} - t \quad (24)$$

如图 2 所示, 为使实时算法的充放电规划能充分配合一定时长内的基础负荷变化情况, 其优化范围动态变化。优化范围的大小取当前时间段可调度车辆的剩余可调度时间的最大值:

$$W_t = \max \{ \cup H_i^{\text{left}}, i \in N' \} \quad (25)$$

其中, W_t 为时间段 t 的优化范围。

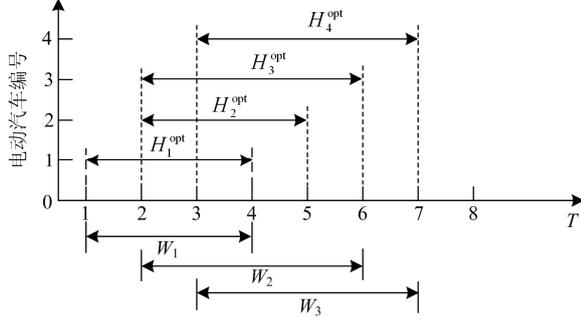


图 2 各时间段的优化范围

Fig. 2 Optimization range of each time slot

如图 3 所示, 每个时间段计算得到的调度策略长度均为相应的优化时间窗, 如 Solution 1 长度为 3。电动汽车将收到的调度策略的首部作为当前时间段的充放电策略, 如时间段 2 所选用的策略为 S2-1。全天的调度策略即由这些部分组成。

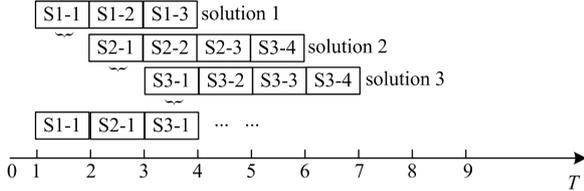


图 3 各时间段的调度策略

Fig. 3 Scheduling strategy of each time slot

2.2 网损灵敏度指标

电动汽车充放电行为引起的网损成本与节点性能紧密相关。同时, 在优化迭代过程中调度策略会为各节点分配不同的负荷量, 直接通过潮流计算的方式计算网损会大大增加优化过程的耗时, 导致调度中心不能及时向所有电动汽车用户提供充放电规划。因此考虑使用网损灵敏度(Power Loss Sensitivity, PLS)作为决策的辅助手段。

网损灵敏度表示网损对节点注入功率的灵敏度, 宏观上可以视为电网节点增加单位负荷量后引起的网损大小。计算网损灵敏度时, 首先将当前时间段的基础负荷分配到电网中, 再依次计算网损关于节点有功功率的偏微分, 表达式为

$$PLS_m = \frac{\partial S}{\partial P} = \frac{S^{P+\Delta P} - S^P}{\Delta P} \quad (26)$$

其中, PLS_m 为节点 m 的网损灵敏度; S 表示网损; P 表示该节点注入的有功功率。根据潮流计算中的雅克比矩阵可以得到网损关于有功功率的偏微分如式(27)。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial P} \\ \frac{\partial S}{\partial \theta} \\ \frac{\partial S}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P}{\partial |V|} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial \theta} \\ \frac{\partial S}{\partial |V|} \end{bmatrix} \quad (27)$$

其中: Q 为节点注入的无功功率; $|V|$ 和 θ 为节点电压的幅值和相角。

将优化目标函数中的网损成本改写为网损灵敏度指标 J'_2 , 如式(28)。

$$J'_2 = \sum_{m=1}^M k_3 PLS_m L_m^{EV} \quad (28)$$

其中: L_m^{EV} 为节点 m 上电动汽车的总负荷; k_3 为折算系数。

此外, 网损灵敏度基于电网基础负荷计算得到, 即每个时间段对应一组网损灵敏度。由于调度策略采用的基础负荷为日前预测数据, 因此可以在每日调度开始前将所有时间段的网损灵敏度离线计算完毕。在后续优化过程中只需要依据电动汽车在相应节点的充放电行为即可计算网损灵敏度指标, 从而避免了反复进行潮流计算。

2.3 算法描述

根据上述分析, 将 1.3 节的优化问题修改如下。

$$\min_{X'} \{J_1 + J'_2\} \quad (29)$$

subject to:

$$z_t = L_t^{\text{base}} + \sum_{i=1}^{N'} x'_{i,t} \quad (30)$$

$$E_i^{\text{in}'} + \sum_{t=t_i^{\text{in}}}^{t_i^{\text{off}}} \tau x'_{i,t} \geq E_i^{\text{off}} \quad \forall i \in N' \quad (31)$$

$$0 \leq E_i^{\text{in}'} + \sum_{t=t_i^{\text{in}}}^{t_q} \tau x'_{i,t} \leq E_i^{\text{cap}} \quad (32)$$

$$\forall i \in N', \forall t_q \in W_t$$

$$0 < x'_{i,t} < P^{\text{char}} \quad \forall i \in N^{\text{CHAR}}, \forall t \in W_t \quad (33)$$

$$P^{\text{dis}} < x'_{i,t} < P^{\text{char}} \quad \forall i \in N^{\text{V2G}}, \forall t \in W_t \quad (34)$$

优化流程如图 4 所示。在每日的调度开始前, 调度中心更新当日的基础负荷预测数据和电网模型数据, 基于基础负荷进行潮流计算, 并据此计算全天各时间段各节点的网损灵敏度。每个时间段开始时刻更新电动汽车数据, 包括已入网车辆和当前时间段入网车辆, 共同组成可调度车辆 N' 。基于可调度车辆的剩余可调度时间确定当前时间段的优化范围 W_t , 并构造 $N' \times W_t$ 的充放电控制矩阵 X' 。

由于目标函数为凸函数, 并且所有约束条件均为线性约束, 因此该优化问题可以采用凸优化方法解决。本文采用内点法进行求解。在得到充放电控

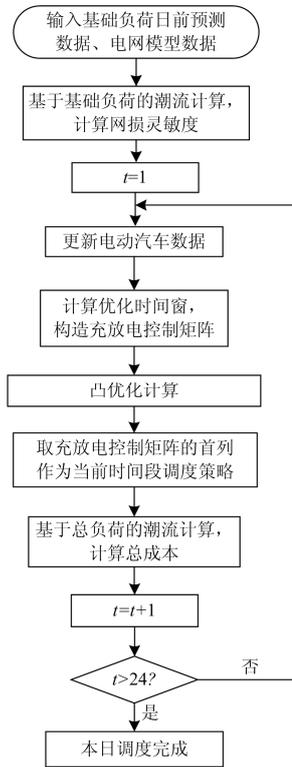


图 4 实时优化流程图

Fig. 4 Real-time optimization flow chart

制矩阵后取首列作为当前时间段的调度策略执行。将基础负荷与电动汽车负荷更新到电网中进行潮流计算，计算当前时间段的网损成本和充电成本。在一个调度循环周期结束后计算总成本。

3 仿真实例

3.1 仿真环境

仿真环境基于 IEEE 33 节点配电网测试系统建立^[16]。该测试系统结构如图 5，电压基准值 12.66 kV，平衡节点为节点 1。

负荷数据来自文献[17]中的 2011 年美国交通部对全美家用车辆行驶的调查结果(National Household Travel Survey, NHTS)，包括电动汽车用户的行驶特性、入网时间、初始荷电状态等关键参数。

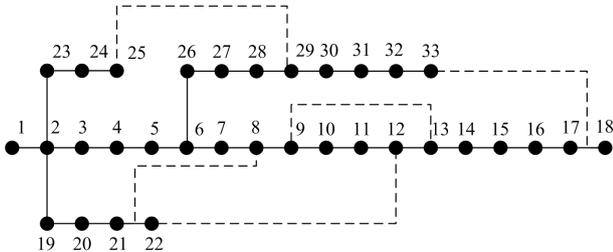


图 5 IEEE 33 节点配电网测试系统

Fig. 5 IEEE 33 bus distribution test system

电动汽车入网时间符合正态分布， $\mu_1 = 15.9$ ， $\sigma_1 = 4.0$ 。电动汽车日行驶里程符合对数正态分布， $\mu_2 = 3.4$ ， $\sigma_2 = 0.5$ ，入网时的初始荷电状态与此相关。本文采用蒙特卡洛方法由此生成原始数据，共计 100 辆电动汽车，如图 6、图 7 所示。

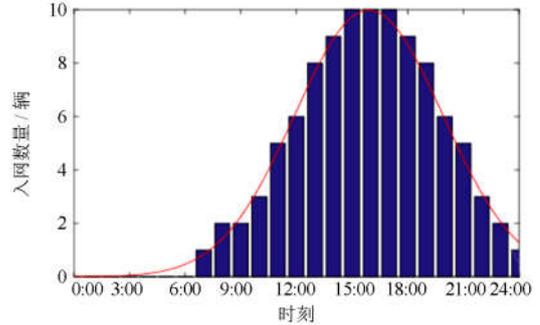


图 6 各时间段入网电动汽车数量

Fig. 6 Number of electric vehicles connected to grid of each time slot

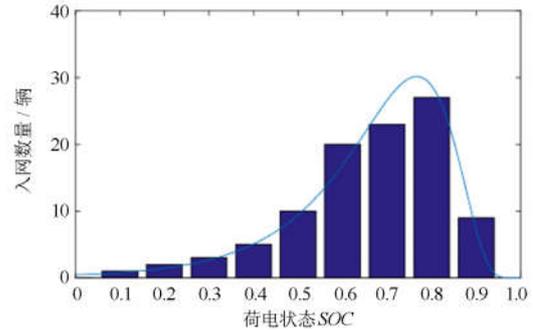


图 7 电动汽车初始荷电状态

Fig. 7 Initial SOC of electric vehicles

其他仿真相关参数设置如表 1。其中，电动汽车电池最大容量 15 kWh，用户的目标离网电量为满电，充电、放电速率上限均为 3 kW。

表 1 仿真相关参数设置

Table 1 Simulation parameters setting

参数	取值	参数	取值
E^{cap} / kWh	15	γ	0.5
E^{off} / kWh	15	k_0	0.01
P^{char} / kW	3	k_1	0.01
P^{dis} / kW	-3	k_2	100
T	24	k_3	30

考虑到调度策略的连续性，要求每日 6:00 前完成当前周期内所有车辆充电任务，同时更新日基础负荷预测数据。因此，本文仿真的初始时刻为 6:00，至次日 6:00 结束。

在原始状态下，电动汽车从接入电网开始以允

许的最大充电速率充电, 电池充电完毕后切出电网。由此得到原始动态下总负荷与基础负荷对比情况如图 8 所示。电动汽车大量接入的时刻与基础负荷的峰值时刻相近, 导致大量电动汽车在电网负担较大时进行充电, 充电成本和网损成本大大增加。而在 3:00 附近为电网非峰值时刻, 电网负担较小, 电价较低, 仅有少量电动汽车进行充电。

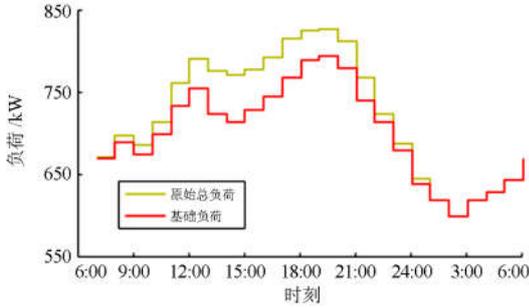


图 8 原始状态总负荷与基础负荷对比

Fig. 8 Comparison of total load and basic load in original state

基于基础负荷计算各时间段的网损灵敏度。图 9 为 $t=1$ 时的各电网节点网损灵敏度。

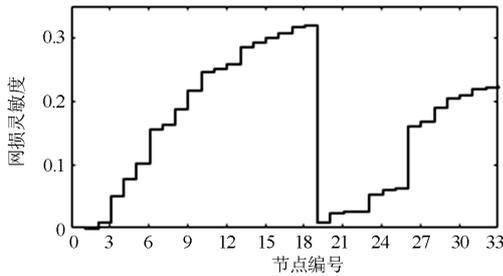


图 9 $t=1$ 时各电网节点网损灵敏度

Fig. 9 Power loss sensitivity of buses when $t=1$

显然节点 18、节点 33 等节点具有较大的网损灵敏度, 在网损灵敏度指标计算中会产生较大的影响。其中节点 1 为电网模型中的平衡节点, 网损灵敏度为 0, 且该节点禁止接入电动汽车。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 充放电行为分析

根据图 10、图 11 的负荷统计, 调度中心针对出现在 12:00 附近、20:00 附近的基础负荷峰值均进行了规避, 避免高电价充电。由于峰值大小间接决定了调度中心的调度能力, 因此在峰谷差距较小的 12:00 附近, 电动汽车净负荷变化并不明显。导致这一现象的另一原因是此时接入电网并可供调度的电动汽车数量有限, 无法实现接大规模的负荷转移。由图 12 可以看到, 在 12:00 附近, V2G 车辆放电供应其他车辆充电, 使得电动汽车净负荷接近于零。

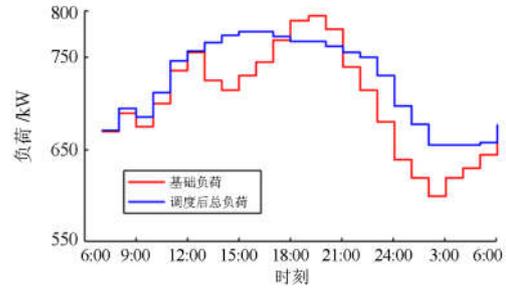


图 10 调度后总负荷与基础负荷对比

Fig. 10 Comparison of total load and base load after scheduling

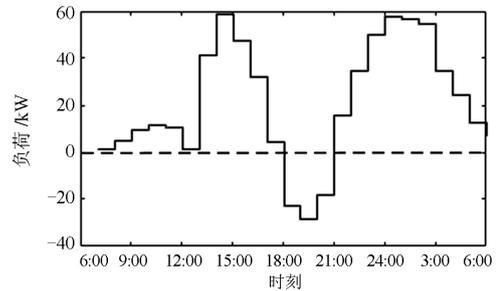


图 11 调度后电动汽车净负荷

Fig. 11 Net load of electric vehicle after scheduling

在峰谷差距较大的 20:00 附近, 电动汽车净负荷为负, 电动汽车的充放电行为具体表现为大量 V2G 车辆向电网馈电, 少部分仅支持充电的电动汽车进行充电。由图 12 可以看到 20:00 附近由于大量电动汽车进行放电, 调度后总负荷明显低于基础负荷曲线, 负荷峰值时期的充电成本与网损成本得到大幅降低。

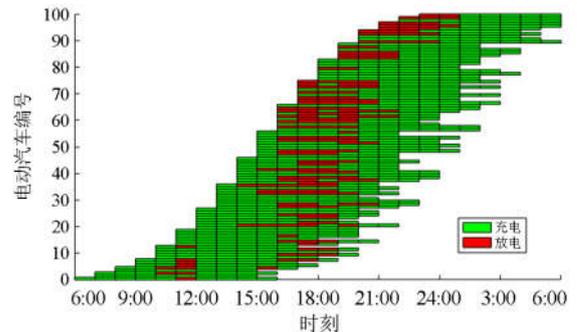


图 12 电动汽车充放电行为记录

Fig. 12 Charge and discharge behavior records of electric vehicles

此外, 在 3:00、15:00 等非峰值时刻, 电网整体负担较轻, 电动汽车的充放电行为具体表现为集体充电, 抬高了非峰值时刻总负荷。

对具体数据分析发现, 原始状态下电网总负荷峰值为 19:00 的 826.5 kW, 次峰值为 12:00 的 791.0 kW, 总负荷最低值为 4:00 的 601.8 kW, 峰谷差

为 224.7 kW, 标准差为 73.7。应用调度策略后总负荷峰值为 14:00 的 777.9 kW, 并且在 11:00 至 21:00 内总负荷均保持在 745.3~777.9 kW。总负荷最低值为 5:00 的 654.7 kW, 峰谷差为 123.2 kW, 标准差为 46.5。

从宏观上来看, 实时算法实现了在较大时间范围内的负荷转移, 达到了削峰填谷的效果。这也是所提策略能够降低各项成本的主要原因。

3.2.2 充电成本与网损成本分析

2.2 节的分析表明, 充电成本与网损成本均与总负荷曲线紧密相关。

对调度前后的案例进行成本分析。原始状态下充电成本为 1 931.4 元, 网损成本 177.5 元, 平均每车每日总成本为 21.1 元; 调度后充电成本为 1 743.5 元, 网损成本为 163.4 元, 平均每车每日总成本为 19.1 元。

调度后充电成本降低 9.7%, 网损成本降低 7.9%, 平均每车每日总成本降低 9.5%。

图 12 同时也表明大部分电动汽车的充放电行为较为规律, 表现为峰值时期放电, 低谷时期充电。仅有极少量电动汽车在入网时间内进行了反复多次的充放电, 因此本调度策略也在一定程度上降低了电池损耗的成本。

3.3 V2G 比例对车网协作的影响

在第一节的仿真中 $\gamma = 0.5$, 即占总量 50% 的电动汽车支持 V2G。改变其 V2G 比例进行仿真并分析。

如图 13 所示, 随着 V2G 比例的升高, 总负荷曲线逐渐趋于平缓。在抑制负荷波动的效果上, 三个案例均取得良好的效果, 这主要是因为算法对充电行为也进行了充分规划, 起到了负荷转移的作用, 而放电行为的规划令负荷曲线进一步趋于平滑。三个案例中, 50% 比例相对于 25% 比例提升较为明显, 在峰值时期负荷有较为明显的降落, 在非峰值时刻负荷有较为明显的抬升, 峰谷差缩小。而 75% 比例

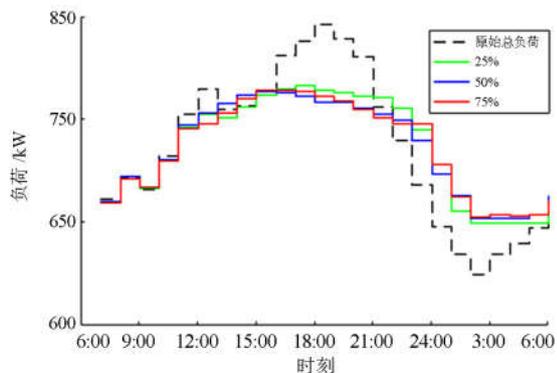


图 13 不同 V2G 比例下的负荷调度情况

Fig. 13 Load scheduling under different V2G ratios

相对于 50% 比例有一定的改善, 但提升较小。本算法对 V2G 比例的要求并不严苛, 在 V2G 比例为 50% 左右时, 即可取得比较理想的结果。

表 2 表明, 在本文的电价制度下, 对于电动汽车用户来说, 电动汽车放电是一种降低总成本的有效手段。当电网中的电动汽车 V2G 比例较低时, 出现负荷紧张时对放电行为的需求度较高, 电动汽车放电效果明显, 成本大幅降低; 但是当 V2G 比例较高时, 电量需求被大幅稀释, 因此成本无法进一步降低。

表 2 不同 V2G 比例下的调度效果

Table 2 Scheduling effect under different V2G ratios

V2G 比例	峰谷差/kW	标准差	每车每日成本/元
25%	130.2	51.2	19.6
50%	123.2	46.5	19.1
75%	122.4	46.2	19.0

3.4 渗透率对车网协作的影响

统计数据表明电动汽车正处于高速发展中, 电动汽车在电网中的渗透率也随之升高。考量不同渗透率下电动汽车对电网的影响非常重要^[18-20]。不同渗透率的电动汽车在本算法调度下表现如图 14。

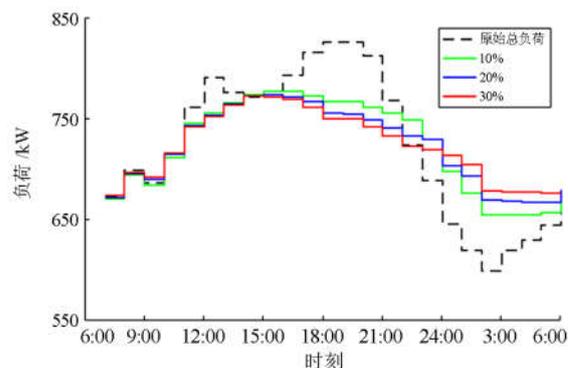


图 14 不同渗透率下的负荷调度情况

Fig. 14 Load scheduling under different penetration

电动汽车渗透率分别为 10%、20%、30% 时的负荷曲线表明随着渗透率增加, 电动汽车削峰填谷的能力得到增强, 负荷曲线更加平坦, 意味着在本文电价制度下总成本进一步降低。调度效果如表 3 所示。

值得注意的是, 在 12:00 的次峰值附近, 三种渗透率的负荷曲线区别不大。一是由于此时可调度车辆较少; 二是由于此时负荷波动幅度较小, 在渗透率较小的情况下电动汽车也能起到良好的调节效果。在 20:00 的峰值附近和 3:00 的低谷值附近, 30% 渗透率的电动汽车表现明显优于其余两者, 表明较高的渗透率保证了电动汽车有充足的负荷吞吐量,

用于应对大规模的负荷波动^[21-22], 防止出现某一时间段的充电成本与网损成本过高的情况。

表 3 不同渗透率下的调度效果

Table 3 Load scheduling under different penetration

渗透率	峰谷差/kW	标准差	每车每日成本/元
10%	129.2	107.0	94.5
20%	48.4	39.2	35.0
30%	19.5	19.3	20.3

以上实验表明, 采用所提的调度策略对电动汽车充放电行为进行规划时, 所有电动汽车均能按时按量完成用户设定的充电任务。在此基础上, 调度策略有效降低了充电成本与网损成本, 同时还具有改善电网负荷曲线的效果。

调度策略对 V2G 比例的要求并不苛刻。V2G 比例为 25% 时依然可以取得较好的效果。随着 V2G 比例的提升, 调度效果有所改善。

调度策略的效果对电动汽车渗透率比较敏感。在高渗透率的案例中, 总成本与负荷曲线的改善效果更明显。从调度循环周期来看, 在初始时段电网中的可调度车辆总数较少, 对电能的吞吐量不足, 调度中心对电网负荷的调节能力相对薄弱; 在中间时段随着大量电动汽车入网, 调度中心对负荷峰值的响应能力大大提升, 能更好地实现降低成本的调度目标。

4 结论

本文提出了一种基于 V2G 技术的电动汽车实时调度策略, 根据网损灵敏度值表分析节点性能, 利用潮流计算与凸优化算法得到充放电策略。仿真表明本文方法能够有效降低电动汽车充电成本与电网的网损成本。主要结论如下:

1) 在分时电价制度下, 采用凸优化算法实时求解得到的充放电策略可以在按时完成充电任务的前提下有效降低充电成本与网损成本。

2) 策略制定时通过构建网损灵敏度指标充分考虑了节点性能对成本的影响, 同时简化了网损成本计算过程。

3) 所提策略在不同的电动汽车渗透率和 V2G 占比下均有降低成本、优化负荷曲线的效果。

参考文献

[1] HAFIZ F, DE QUIEROZ A R, HUSAIN I, et al. Charge scheduling of a plug-in electric vehicle considering load demand uncertainty based on multi-stage stochastic optimization[C] // North American Power Symposium, September 17-19, 2017, Morgantown, WV, USA: 1-6.

- [2] WEN C K, CHEN J C, TENG J H, et al. Decentralized plug-in electric vehicle charging selection algorithm in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1779-1789.
- [3] 王彪, 尹霞. 实时电价下含 V2G 功能的电动汽车理性充放电模型及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 90-96.
WANG Biao, YIN Xia. Modeling and analysis on the rational charging and discharging of electric vehicle with V2G function under real-time prices[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 90-96.
- [4] 张祥文, 江星星, 王龙. 配电网接纳电动汽车能力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 14-20.
ZHANG Xiangwen, JIANG Xingxing, WANG Long. Research on assessment methods of distribution network's ability of admitting electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 14-20.
- [5] 马益平. 考虑电动汽车调度的微电网混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 98-107.
MA Yiping. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for micro-grid considering EV scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 98-107.
- [6] 肖浩, 裴玮, 孔力. 含大规模电动汽车接入的主动配电网多目标优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 2): 179-189.
XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li. Multi-objective optimization scheduling method for active distribution network with large scale electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 179-189.
- [7] 舒隽, 唐刚, 韩冰. 电动汽车充电站最优规划的两阶段方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 10-17.
SHU Jun, TANG Gang, HAN Bing. Two stage method for optimal planning of electric vehicle charging station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 10-17.
- [8] RICHARDSON P, FLYNN D, KEANE A. Local versus centralized charging strategies for electric vehicles in low voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 1020-1028.
- [9] 常方宇, 黄梅, 张维戈. 分时充电价格下电动汽车有序充电引导策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2609-2615.
CHANG Fangyu, HUANG Mei, ZHANG Weige. Research on coordinated charging of electric vehicles based on TOU charging price[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2609-2615.
- [10] 丁丹军, 戴康, 张新松, 等. 基于模糊多目标优化的电

- 电动汽车充电网络规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 43-50.
- DING Danjun, DAI Kang, ZHANG Xinsong, et al. Network planning for electric vehicle charging based on fuzzy multi-objective optimization[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 43-50.
- [11] VAGROPOULOS S I, BALASKAS G A, BAKIRTZIS A G. An investigation of plug-in electric vehicle charging impact on power systems scheduling and energy costs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 1902-1912.
- [12] 王鑫, 周步祥, 唐浩. 考虑用户因素的电动汽车有序充放电控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 64-69.
- WANG Xin, ZHOU Buxiang, TANG Hao. A coordinated charging/discharging strategy for electric vehicles considering customers' factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 64-69.
- [13] 刘东奇, 王耀南, 袁小芳. 电动汽车充放电与风力/火力发电系统的协同优化运行[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 18-26.
- LIU Dongqi, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang. Cooperative dispatch of large-scale electric vehicles with wind-thermal power generating system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 18-26.
- [14] XIA M, LAI Q, ZHONG Y, et al. Aggregator-based interactive charging management system for electric vehicle charging[J]. Energies, 2016, 9(3): 1-14.
- [15] SACHAN S, ADNAN N. Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 40: 91-100.
- [16] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [17] GARCÍA-VILLALOBOS J, ZAMORA I, EGUIA P, et al. Modelling social patterns of plug-in electric vehicles drivers for dynamic simulations[C] // 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference, December 17-19, 2014, Florence, Italy: 1-7.
- [18] 刘琰, 何伟哲. 电动汽车充电模式选择与充电负荷计算的研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(10): 129-133.
- LIU Yan, HE Weizhe. Research on charging mode selection and charging load calculation of electric vehicles[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(10): 129-133.
- [19] 周天沛, 孙伟. 基于微网的电动汽车与电网互动技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 98-104.
- ZHOU Tianpei, SUN Wei. Electric vehicle-to-grid technology based on microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 98-104.
- [20] MOON S K, KIM J O. Balanced charging strategies for electric vehicles on power systems[J]. Applied Energy, 2017, 189: 44-54.
- [21] 娄素华, 张立静, 吴耀武, 等. 低碳经济下电动汽车集群与电力系统间的协调优化运行[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 176-183.
- LOU Suhua, ZHANG Lijing, WU Yaowu, et al. Coordination operation of electric vehicles and power system under low-carbon economy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 176-183.
- [22] 周强. 电动汽车充电服务互联互通问题的探讨[J]. 供用电, 2017, 34(1): 19-23.
- ZHOU Qiang. Discussion on the interconnection of electric vehicle charging service[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(1): 19-23.

收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2019-01-18

作者简介:

陈凯炎(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网与电动汽车负荷调度; E-mail: 2461365998@qq.com

牛玉刚(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为随机系统、无线传感网络、智能电网。

(编辑 葛艳娜)